

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

**НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ**

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2017

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН,
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Энов

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, председатель Президиума
Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово; научный руководитель Института
нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
А. Э. Конторович

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук,
генеральный директор АО «СНИИГГиМС», Новосибирск
А. С. Ефимов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному
округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля
2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторожде-
ний полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т.
Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 351 с.

ISBN 978-5-906948-27-4 (т. 2)

ISBN 978-5-906948-25-0

ISBN 978-5-906948-11-3

В сборнике опубликованы материалы XIII Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017», представленные на Международной научной конферен-
ции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и раз-
работки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-906948-27-4 (т. 2)

ISBN 978-5-906948-25-0

ISBN 978-5-906948-11-3

© СГУГиТ, 2017

К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГИИ ГАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Татьяна Анатольевна Киряева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

В статье показано, что рассматривая газодинамическую реакцию угольного пласта на технологическое воздействие как следствие реализации энергетического потенциала двухкомпонентной среды при смене метастабильных состояний можно на качественно новом уровне решать задачи количественной градации газодинамической активности углеметанового пласта.

Ключевые слова: уголь, энергия, газодинамическая активность угольных пластов, выбросоопасность, выход летучих.

EVALUATION OF GAS COMPONENT ENERGY IN A COAL SEAM

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The paper points out that consideration of gas-dynamic response of a coal seam to mining activities as a consequence of realization of energy potential of a two-component medium with changes in metastable state enables to solve problems on quantitative gas-dynamic activity gradation of a coal-methane seam at the new grade level.

Key words: coal, energy, gas-dynamic activity of coal seams, outburst hazard, volatile yield.

Перспективы подземной разработки газоносных угольных месторождений и технико-экономические показатели работы шахт в значительной мере определяются горно-геологическими особенностями месторождений, свойствами и состоянием геоматериалов. Ритмичная и эффективная работа предприятия зависит от надежности прогнозов природных условий, включая и достоверность оценок газодинамической активности угольных пластов.

Для создания научно обоснованного методического обеспечения горнотехнологических оценок и решений не ниже мирового уровня необходимо, прежде всего, разработать методы количественного определения газодинамической активности пластов, обеспечивающие единство подхода к анализу возможной динамики реализации энергии содержащегося в угле газа.

Ранее, в информационной основе методов оценки газодинамической опасности углеметановых пластов, разработанных Т.А. Киряевой [1] были заложены как геологоразведочные данные (глубина залегания пласта, метаноносность, выход летучих веществ, петрографический состав, влажность, зольность), так и определяемые показатели, например, сорбционной способности угля по отношению к метану. Общий недостаток этих методов - качественный характер оценки.

В то же время, рассматривая газодинамическую реакцию угольного пласта на технологическое воздействие как следствие реализации энергетического потенциала

двухкомпонентной среды при смене метастабильных состояний можно на качественно новом уровне решать задачи количественной градации газодинамической активности углеметанового пласта.

Для этих исследований в [1] была использована электронная база геологоразведочных данных по 15600 пластопересечениям 11 месторождений Кузбасса, охватывающая все стратиграфические структуры бассейна. Диапазоны изменения приводимых здесь значений достаточно полно охватывают различные свойства каменных углей этого угольного бассейна: $0,7\% \leq W \leq 9\%$; $1,3\% \leq P \leq 30\%$; $7\% \leq V^{daf} \leq 45\%$; $30 \text{ м} \leq H \leq 1050 \text{ м}$ (W – аналитическая влажность, %; P – пористость, %; V^{daf} – выход летучих, %; H – глубина залегания пласта в точке отбора пробы, м).

Вся выборка данных по Кузбассу была разделена на подсерии и свиты. Для каждой из них определялись границы только максимальных для соответствующей глубины значений метаноносности (рис. 1 а, б). Согласно М.А. Еремкову [2], наиболее удобно графики этих границ аппроксимировать уравнением Ленгмюра

$$X = ABS/(1+BS), \quad (1)$$

где: X – максимальная метаноносность пласта, $\text{м}^3/\text{т}$; A – предельная метаноносность, при данном выходе летучих веществ, $\text{м}^3/\text{т}$; B – коэффициент метаноносности, при данном выходе летучих веществ, $1/\text{МПа}$; $S=0,25H$, МПа ; H – глубина залегания пласта, м.

Методом рандомизации для всех угленосных свит Кузбасса были получены значения эмпирических коэффициентов A и B уравнения Ленгмюра (1) и найдена их связь со средним значением выхода летучих веществ на глубине 100 м для свит Кузнецкого бассейна [3]:

$$A = -0,1017(V^{daf})^2 + 4,979V^{daf} + 11,043, \text{ м}^3/\text{т}; \quad (2)$$

$$B = 0,00019(V^{daf})^2 - 0,0097V^{daf} + 0,174, 1/\text{МПа};$$

где: V^{daf} – среднее значение выхода летучих веществ на глубине 100 м, %

Параметры A и B являются функциями выхода летучих веществ, т. е. учитывают марочный состав углей.

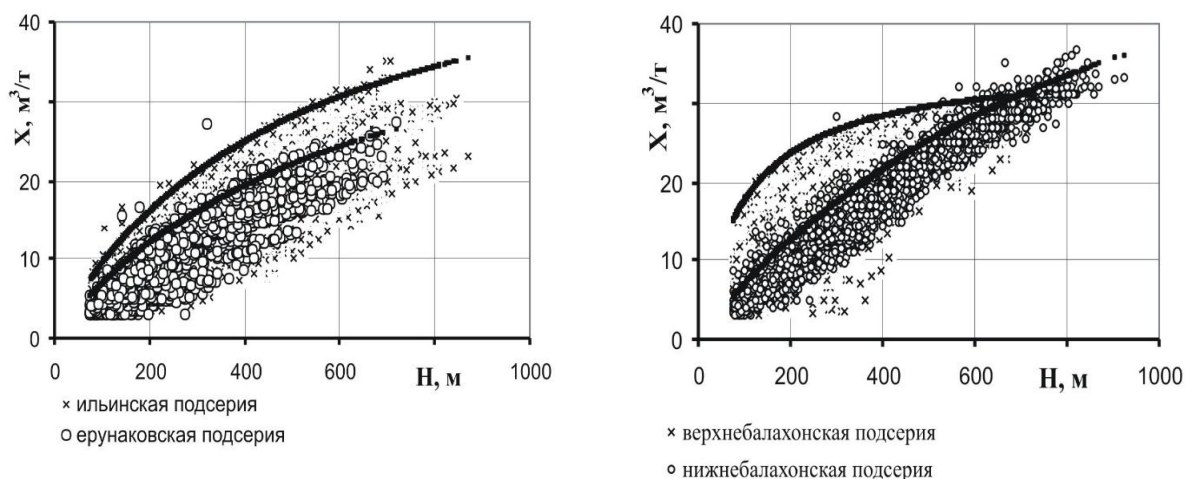


Рис. 1. Изменение метаноносности углеметановых пластов Кузбасса с глубиной их залегания:

а) кольчугинской серии; б) балахонской серии

Полученные результаты [3] позволили обосновать новый подход к выбору показателя энергетического потенциала двухкомпонентной среды при смене метастабильных состояний в дислокационных моделях процессов, возникающих, например, за фронтом волны разгрузки пласта от механических напряжений при очередном перемещении плоскости забоя горной выработки.

Метаноносность-это, по сути, объем метана, который содержится в единице массы или объема горных пород в природных условиях в неразгруженном угольном пласте. Как известно произведение объема на соответствующее давление даст характеристику внутренней энергии объекта исследования, в нашем случае газа метаноугольного пласта. Для пояснения этого метода, используя общие положения теории устойчивости и бифуркаций [4], проанализируем особенности изотермы Ленгмюра для метаноносности угольных пластов Кузбасса (рис. 2).

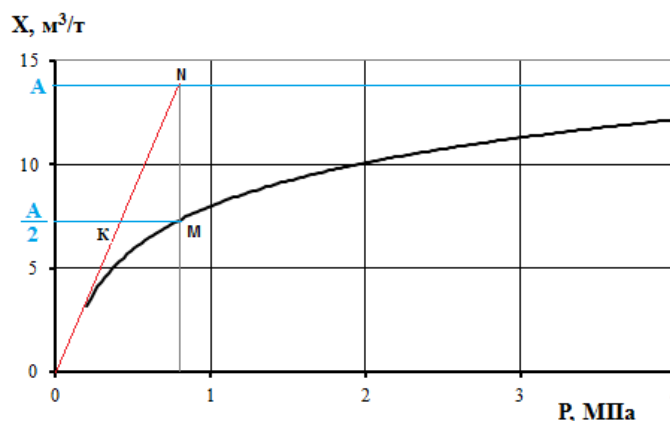


Рис. 2. Типичная изотерма Ленгмюра для метаноносности угольных пластов Кузбасса

На рис. 2 показано предельное значение A метаноносности для каждой подсерии, которое является асимптотой соответствующей изотермы. Кроме того, к изотерме Ленгмюра проведена касательная ON в точке $P=0$, угол ее наклона определяет коэффициент метаноносности B , который, в свою очередь, характеризует градиент давления газа в данной точке угольного пласта

На рис. 2. абсцисса точки пересечения значений предельной сорбционной метаноносности A и касательной ON к графику функции при $P=0$ отвечает величине метаноносности, строго равной половине ее предельного значения $A/2$. Соответствующая этой точке ордината на графике функции Ленгмюра определяет емкость релаксации ($C_{рел}$) выведенной из равновесия системы уголь-метан:

$$C_{рел} = A/2, \text{ м}^3/\text{т} \quad (3)$$

Согласующееся изменение давления газа определяет второй параметр – давление релаксации ($P_{рел}$).

$$P_{рел} = \frac{A}{\left. \frac{dX}{dp} \right|_{P=0}}, \text{ МПа} \quad (4)$$

Их производство определяет энергетический показатель системы «углеметан» (E), т.е. площадь треугольника KNM является той энергетической характеристикой E, которая определяет состояние углеметана при переходе его из одного метастабильного состояния в другое при изменении метаноносности в 2 раза. Эта энергетическая характеристика впоследствии была названа автором удельной энергией релаксации метаноносности. В [5] были определены значения этой энергии E (кДж/кг):

$$E = 0,25 \frac{A}{B}, \quad (5)$$

Оценка E выполнялась по предельным значениям метаноносности угольного пласта, когда ее величина определяется только растворенным метаном, а содержание других его фазовых состояний считалось пренебрежимо малым. Полученные результаты исследования позволяют оценить возможное участие энергии газовой составляющей E (кДж/моль) в газодинамическом процессе на стадии развития микро, а затем и макротрещин (рис. 3).

Этот результат не только разделяет стратиграфические структуры Кузбасса согласно их газодинамической активности [6], но и выделяет наиболее опасную из них – нижнебалахонскую подсерию.

В тоже время, отдельные свиты кольчугинской серии на некоторых участках месторождений также способны создать серьезные затруднения при ведении горных работ. Уровень газодинамической активности пластов верхнебалахонской подсерии остается примерно одинаковым, несмотря на существенно различный выход летучих веществ. Ее пласты расположены по обе стороны от максимума и его не достигают.

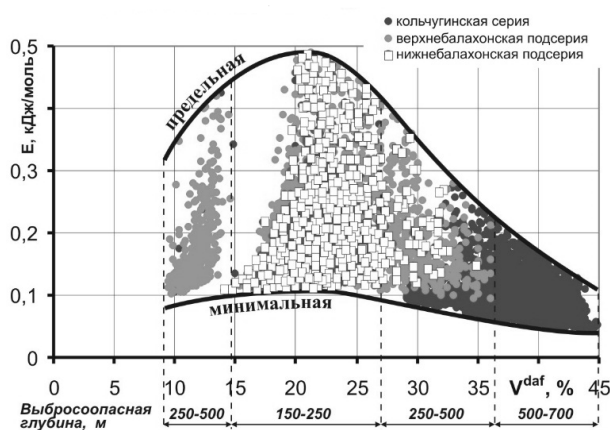


Рис. 3. Изменение энергии релаксации при смене метастабильных состояний углеметановых растворов с различным выходом летучих веществ

Учитывая непрерывность установленной зависимости можно заключить, что сопровождающие распад углеметана процессы развития микротрещин и роста количества свободного и сорбированного метана характерны не только для выбросоопасных зон угольных пластов, а имеют место на всех высокогазоносных пластах. Отличия носят лишь количественную форму. Этот вывод следует из наложения точек, соответствующих менее выбросоопасной, по данным горной

практики, кольчугинской серии на зону балахонской. Это говорит о том, что отдельные участки месторождений кольчугинской серии также способны создать затруднения при ведении горных работ в результате деструкции пласта при распаде углеметанового раствора. Однако эта деструкция, например, при выходе летучих веществ более 40 %, будет сопровождаться недостаточной для внезапного выброса скоростью газовыделения, но способна создать серьезные затруднения при выемке угля.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00537а), проекта ОНЗ РАН-3.1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киряева Т.А. Разработка метода газодинамической активности угольных пластов по геологоразведочным данным на примере Кузбасса / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово, 2005.
2. Ермаков М. А., Ортенберг О. Ш. О применимости теории Лэнгмюра к изучению метаноемкости ископаемых углей // Изв. вузов. Горный журнал. 1976. №
3. Полевщиков Г.Я., Киряева Т.А. Газодинамическая устойчивость углеметана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 7. – № 12. – С. 146-149.
4. Йосс Ж. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Ж.Йосс, Д. Джозеф. – М.: Мир, 1983. – 301 с.
5. Опарин В. Н., Киряева Т.А., Гаврилов В.Ю., Шутилов Р.А., Ковчавцев А.П., Танайно А.С., Ефимов В.П., Астраханцев И.Е., Гренев И.В. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. – С. 3-30.
6. Опарин В.Н., Киряева Т.А. Генетические причины выбросо- и пожароопасности угольных пластов Кузбасса // ГИАБ. – 2015. – №3. – С.400-413.

© Т. А. Киряева, 2017

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА КАК ПРИЗНАК ЕГО ПОВЫШЕННОЙ ВЫБРОСООПАСНОСТИ

Татьяна Анатольевна Киряева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

В статье показано, что основным показателем газодинамической активности углеметанового пласта служит изменчивость свойств по трассе проведения выработки. Примером реализации изложенного подхода служит расчет величины энергетического показателя для пласта XXVII Березово-Бирюлинского месторождения Кузбасса. В зонах наибольшей изменчивости физико-химических свойств угольного пласта вероятность динамических газопроявлений также максимальна, что и подтверждается координатами зарегистрированных внезапных выбросов.

Ключевые слова: уголь, коэффициент крепости угля, энергия, газодинамическая активность угольных пластов, выбросоопасность, выход летучих.

VARIABILITY IN PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A COAL SEAM AS A HIGHER OUTBURST HAZARD SYMPTOM

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The paper proves that the basic parameter of gas-dynamic activity of a coal-methane seam is variability in its characteristics along the face advance track. This approach is verified by energy index calculations for seam XXVII, Berezovo-Biryulinsky colliery, Kuzbass. Zones of the greatest variability of physical-chemical characteristics of a coal seam demonstrate the maximum probability of dynamic gas manifestations. This statement is justified by coordinates of recorded spontaneous outburst events.

Key words: coal, coal hardness ratio, energy, gas-dynamic activity of coal seams, outburst hazard, volatile yield.

Общими признаками всех типов динамических газопроявлений от высыпаний угля с повышенным газовыделением до собственно выбросов угля и газа является внезапность, лавинообразность, очаговый характер и приуроченность к пластам средней стадии метаморфизма. Основным показателем газодинамической активности углеметанового пласта или его зоны служит изменчивость свойств по трассе проведения выработки [1]. Известно, что при входе выработки в зону влияния даже небольшого тектонического нарушения, вероятность внезапного выброса выше, чем при выходе из нее.

Отмеченные особенности газодинамической активности углеметановых пластов заставляют более подробно проанализировать физико-химические свойства углей.

В информационной основе известных методов оценки газодинамической опасности пластов заложены как геологоразведочные данные (глубина залегания пласта, метаноносность, выход летучих веществ, петрографический состав, влажность, золь-

ность), так и определяемые по соответствующим методикам показатели, например, сорбционной способности угля по отношению к метану. Общий недостаток методов - качественный характер оценки. Все что ниже определяемой глубины ведения горных работ «опасно» и только в результате экспертной оценки может быть выделена зона «особо опасная». Соответственно, практически един и комплекс мер по предупреждению опасности, что резко отрицательно влияет на темпы горных работ.

Рассматривая газодинамическую реакцию пласта на технологическое воздействие как следствие реализации энергетического потенциала двухкомпонентной среды при смене метастабильных состояний можно на качественно новом уровне решать задачи количественной градации газодинамической активности углеметанового пласта.

В качестве показателя газодинамической активности пласта K принято отношение значений энергии релаксации метаноносности, разработанной автором в [2] и коэффициента крепости угля, определяемого методом толчения, т.е. по затратам энергии на разрушение. Метод учитывает и известную особенность - при подходе выработки к геологическому нарушению прочность угля снижается, а наибольшая вероятность возникновения газодинамического явления соответствует участку с коэффициентом крепости угля равному 0,7.

$$K \cong 0.05 \left(\frac{AH}{f(1+BH)} \right)^{0.83}, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (1)$$

где: E – энергия релаксации метаноносности, кДж/кг; A – предельная метаноносность при данном выходе летучих веществ, м³/т; B – коэффициент метаноносности при данном выходе летучих веществ, 1/МПа; H – глубина залегания пласта, м; f – коэффициент крепости угля по М.М. Протоdjяконову, усл. ед.

Генетически предопределенное сочетание изменчивости свойств угольного пласта (глубины залегания пласта, газоносности, выхода летучих и влажности) дестабилизирует углеметановый пласт при приближении выработки. В этих зонах вероятность динамических газопроявлений вплоть до внезапных выбросов угля и газа максимальна.

Объединив в этом показателе сведения о свойствах угля и условиях залегания пласта (глубина залегания пласта, газоносность, выход летучих и влажность), метод позволяет выделить не только наиболее энергонасыщенные зоны, но и, что намного важнее, локализовать области повышенной изменчивости энергетического потенциала.

В качестве примера на рис. 1 приведены построенные по геологоразведочным данным характеристики угольного пласта XXVII шахты «Первомайская» (Кузбасс), показаны пройденные подготовительные выработки с нанесением мест возникновения внезапных выбросов, на рис. 2 карта показателя газодинамической деструкции этого пласта.

На рис.1 выделены зоны 1 и 2 фактической выбросоопасности и зона 3 повышенной газодинамической активности, выявленная при бурении с конвейерного штрека 35 скважин предварительной дегазации в теле выемочного столба. Бурение сопровождалось интенсивными выбросами в скважины, вплоть до отброса бурового станка массой около 2 т к противоположному борту штрека. В зоне 3 расположено

несколько небольших нарушений с амплитудой от 0,8 до 1,5 м, выявленных при очистных работах.

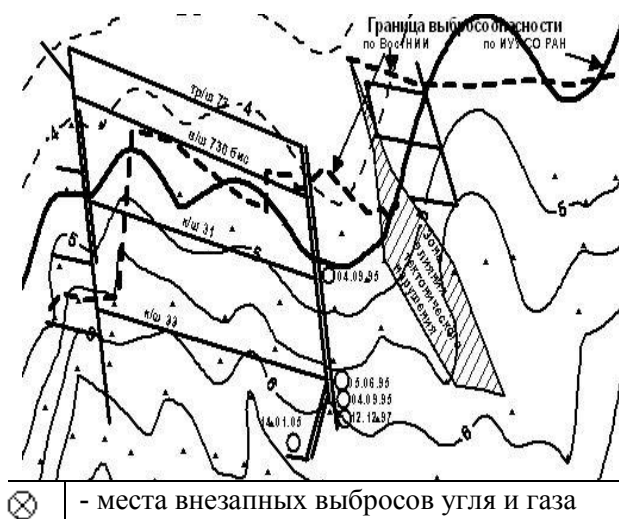
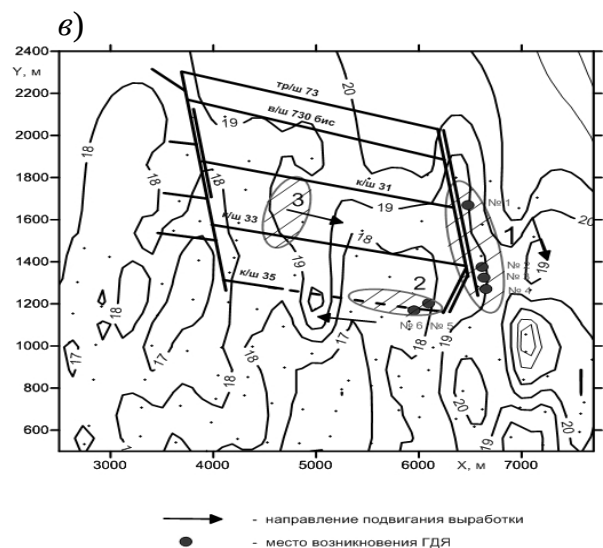
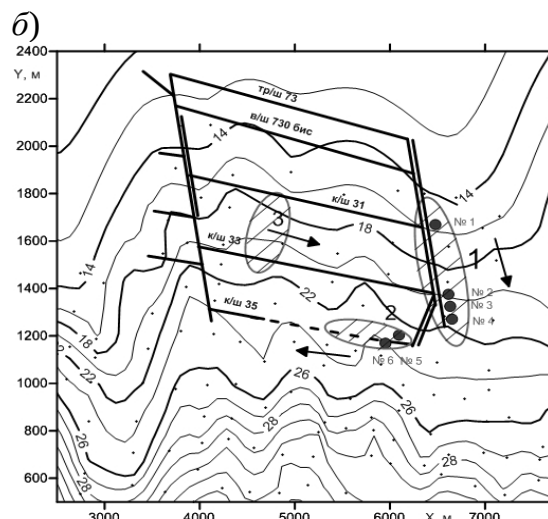
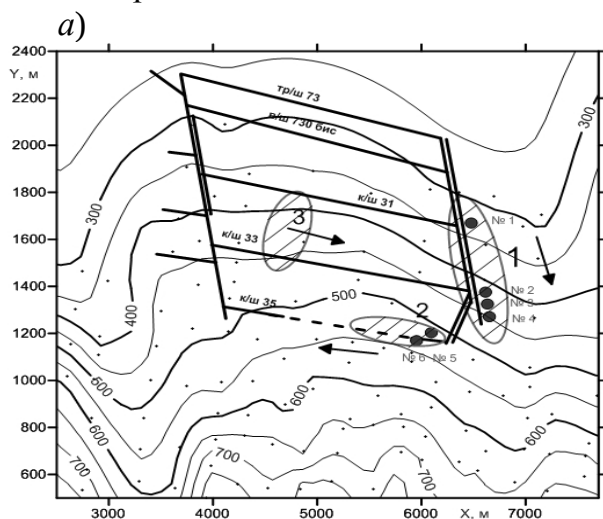


Рис. 1. Изменчивость свойств угольного пласта XXVII Березово-Бирюлинского месторождения Кузбасса по трассе проведения выработки:

а) глубины залегания; б) газоносности;
в) выхода летучих веществ

Рис. 2. Карта показателя газодинамической деструкции пласта XXVII Березово-Бирюлинского месторождения

Показатель газодинамической активности хорошо согласуется:

- с минимальными выбросоопасными глубинами;
- сходимость изолиний показателя газодинамической активности соответствует тенденции ее изменения по методу ВостНИИ;
- значения показателя газодинамической активности, представленные на рис. 2, показывают уровень газодинамической активности. Сила внезапных выбросов угля и газа пропорциональна значениям показателя газодинамической активности.

Объективность количественной оценки газодинамической активности пласта подтверждается значениями параметров зарегистрированных динамических явлений. Критической границе $K=0,75 \text{ м}^2/\text{кг}$ соответствует высыпание угля с повышенным газовыделением, а при $K=0,85 \text{ м}^2/\text{кг}$ – мощный внезапный выброс с количеством выброшенного угля в 350 т и газа 12600 м^3 . Выше изолинии в $0,75 \text{ м}^2/\text{кг}$ газодинамических явлений не зарегистрировано.

Приведенная на рис. 2 критическая граница выбросоопасности по ВостНИИ в целом отражает и основную тенденцию изменения газодинамической активности пласта, но на фоне полученного результата ее можно рассматривать как первое приближение.

Основным источником сведений о свойствах углеметанового месторождения являются данные геологической разведки. Установлено, что геологоразведочные данные и определяемые по соответствующим методам обобщающие показатели обеспечивают выбор решений по управлению газодинамической активностью пластов в необходимом диапазоне от выделения газа при отбойке угля до внезапных выбросов. На этой основе можно получить модели достаточно высокой информационной плотности (рис. 3), что для современных компьютерных систем вполне приемлемо [3].

Поэтапный количественный анализ физико-химических свойств и состояний массива горных пород в [3] позволил получить комбинированную карту энергетического показателя (1) пласта XXI ОАО "Шахта "Первомайская", Кузбасс (рис. 3 внизу). На рис 3 сверху вниз показаны карты глубин залегания угольного пласта, природной газоносности и выхода летучих веществ ОАО "Шахта "Первомайская", Кузбасс.

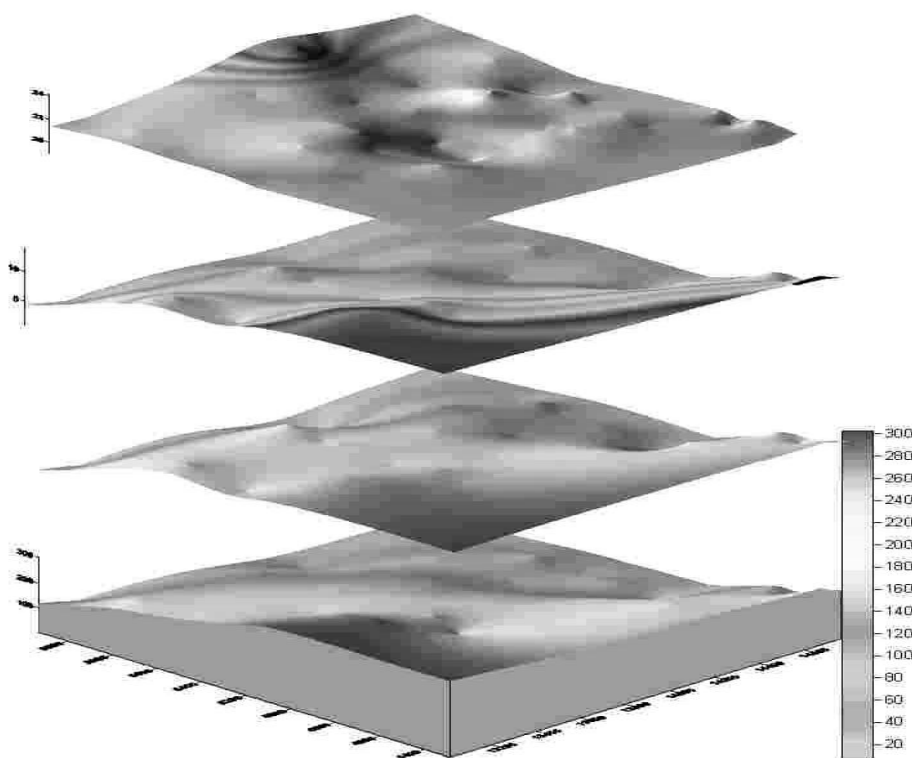


Рис. 3. Комбинированная карта (сверху вниз): глубин залегания, природной газоносности, выхода летучих веществ и энергетического показателя угольного пласта XXI (ОАО "Шахта "Первомайская", Кузбасс).

По осям показаны координаты угольного пласта

Таким образом, разработанный показатель (1) позволяет выделить не только наиболее энергонасыщенные зоны, но и, что не менее важно, области повышенной изменчивости энергетического потенциала. В этих зонах вероятность динамических газопроявлений максимальна, что и подтверждается координатами зарегистрированных внезапных выбросов. При этом виды и предельные параметры возможных динамических газопроявлений также доступны для прогнозирования [4].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00537а), проекта ОНЗ РАН-3.1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полевщиков Г.Я., Киряева Т.А. Газодинамическая устойчивость углеметана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 7. – №12. – С.146-149.
2. Киряева Т.А. Разработка метода газодинамической активности угольных пластов по геологоразведочным данным на примере Кузбасса / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово, 2005.
3. Полевщиков Г.Я., Потапов В.П., Пестриков В.Г., Киряева Т.А. Геоинформационные технологии в решении задач рудничной аэрогазодинамики // Проблемы и перспективы развития горных наук: Международная конференция к 60-летию Горно-геологического института ЗСФ АН СССР – Института горного дела СО РАН. Новосибирск, 2004. – С.10-14.
4. Киряева Т.А., Плаксин М.С., Рябцев А.А. Локальный прогноз газодинамической активности угольного пласта по геологоразведочным данным // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №8. – С.66-69.

© Т. А. Киряева, 2017

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ КЕРНОВ ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Василий Дмитриевич Барышников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 116, e-mail: vbar@misd.ru

Владислав Генрихович Качальский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, e-mail: kwg@ngs.ru

В статье приведено краткое описание программно-технических средств для определения деформационных свойств горных пород при одноосном нагружении образцов керна. Дана оценка точности определения деформационных характеристик на примере образцов доломита, выполнены статистическая обработка и анализ полученных результатов.

Ключевые слова: образец, тензометрическая система, измерительный комплекс, нагрузка, деформация, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

ANALYSIS OF ERROR IN LABORATORY EVALUATION OF STRAIN PROPERTIES OF CORE SPECIMENS

Vasiliy D. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 116, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

Vladislav G. Kachalsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, e-mail: kwg@ngs.ru

The article gives a review on the software and hardware means to determine strain properties of rocks under uniaxial load of core samples. The precision of computed strain characteristic is verified on dolomite specimens. Statistical processing and analysis of the computing data are provided.

Key words: specimen, strain gauge system, measuring system, load, strain, elastic modulus, Poisson's ratio.

В статье приведен анализ результатов лабораторных испытаний деформируемости горных пород по следующим основным показателям:

- модуль упругости (модуль Юнга), являющийся отношением величины напряжения при одноосном сжатии образца керна к его относительной упругой деформации в направлении действия этого напряжения. Для линейно деформируемых материалов модуль упругости является постоянной величиной, не зависящей от величины

напряжения. Таким образом, степень отклонения от линейности при испытании на деформационные свойства может служить характеристикой точности метода определения этой характеристики.

- коэффициент поперечной упругой деформации (коэффициент Пуассона), являющийся отношением упругой деформации в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузки, к относительной упругой деформации в направлении, совпадающим с направлением действия напряжения. Поскольку этот коэффициент зависит от двух составляющих деформации образца в процессе нагружения, то его следует так же учитывать при анализе инструментальной погрешности рассматриваемого способа лабораторных испытаний.

Исследование образцов кернов с использованием тензометров на основе микрометров, с наклейкой тензорезисторов на боковые поверхности кернов, наклейкой опорных шайб[2] для последующего крепления измерительных устройств и других подобных приспособлений занимает много времени и не пригодны для оперативного анализа и статистической обработки результатов в полевых условиях. Задача стояла в определении деформационных свойств при испытании большого числа образцов кернов, полученных из однородного массива доломита с использованием пружинного тензометра для получения характеристик статистической устойчивости полученных результатов. Кроме того, исследовались результаты, полученные при многократных циклах «нагружения – разгрузки» образцов кернов (с гладкой боковой поверхностью керна и обеспечением параллельности его торцов). В последнем случае интересовали статистические показатели устойчивости результатов на одном и том же образце.

Для проведения таких испытаний в соответствии с ГОСТ [1] использовалось технологическое оборудование, включающее лабораторный гидравлический пресс с усилием до 300 кН, центрирующее устройство со сферической опорой, пружинный тензометр ДМ-12 конструкции ВНИИМИ (г.С-Петербург), датчика усилия. Сигналы от тензодатчиков, наклеенных на прижимные резиновые пластины тензометра, и от датчика усилия поступают на измерительный блок, содержащий многоканальный высокоточный аналого- цифровой преобразователь и связанный дискретным каналом передачи данных с персональным компьютером. Для автоматизации измерений, оценки качества опыта и оперативной обработки данных разработаны программные средства, обеспечивающие в том числе графическое отображения на экране ПК деформации в режиме реального времени и позволяющие выбрать диапазон нагрузок для последующего вычисления деформационных свойств в процессе нагружения и разгрузки образца керна (рис. 1).

До начала проведения лабораторных исследований дана оценка допустимого усилия прижима резиновых пластин с наклеенными тензорезисторами, обеспечивающего за счет трения измерение деформаций боковой поверхности образца, сравнимой с показаниями наклеенных на образец тензорезисторов. На рис.2 приведен график изменений деформаций прижима тензодатчиков в осевом направлении при нагружении керна до 40кН в зависимости от давления резиновых пластин на его боковую поверхность. Полученный результат свидетельствует о том, что при усилии прижима резиновых пластин до давления 0.7 – 0.8 МПа обеспечивается полная передача деформаций керна на прижимной тензорезистор.

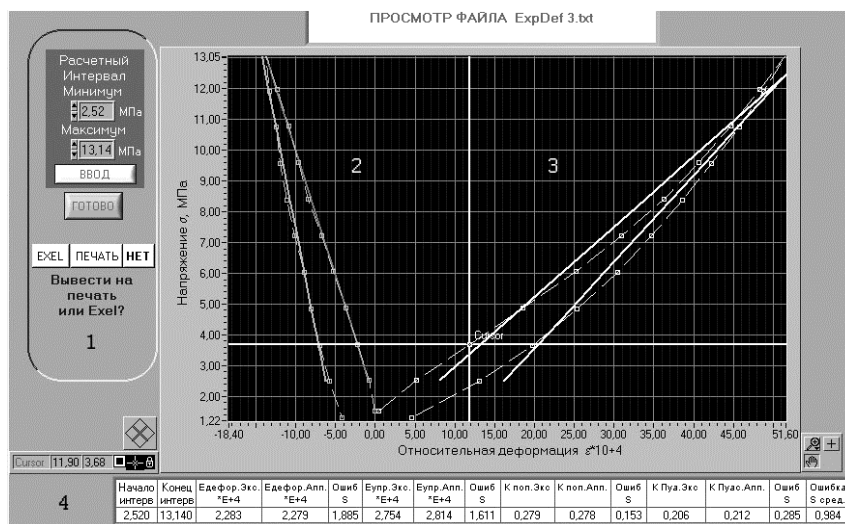


Рис. 1. Экранная форма отображения экспериментальных данных при испытании керна и результатов их обработки:

- 1 – область ввода границ аппроксимации; 2 – область отображения радиальных деформаций; 3 – область отображения осевых деформаций; 4 – таблица результатов эксперимента, аппроксимирующих значений и оценки погрешности определения показателей деформационных свойств

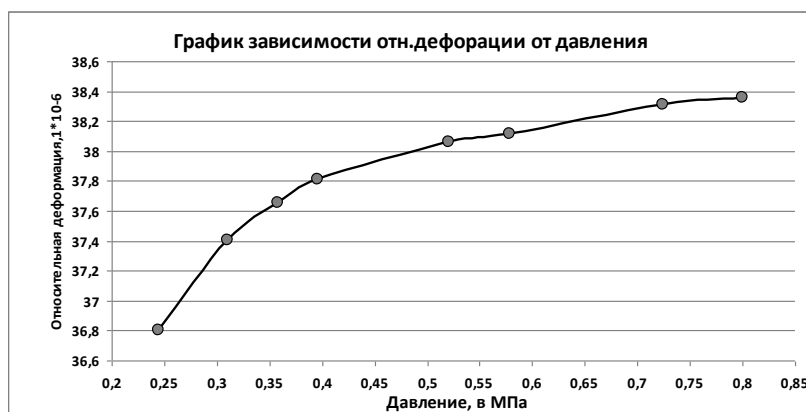


Рис. 2. График зависимости относительной деформации от давления на боковую поверхность кернов, полученный экспериментально. Показания значения относительной деформации наклеенных на боковую поверхность тезорезисторов при таком же усилии в 40 кН составляет $38,5 \cdot 10^{-6}$

В качестве иллюстрации опыта применения прижимного тензометра в таблице приведены результаты определения деформационных свойств доломита по керну, отобранному из двух разноориентированных скважин [3]. Полученные результаты и статистическая оценка погрешности их определения показывают, что коэффициент вариации не превышает допустимых значений в 20%.

**Результаты определения деформационных свойств доломитас
применением прижимного тензометра**

№ скважины	№ образца	Модуль деформ., ГПа	Коэфф. попереч. деформ.	Модуль упругости, ГПа	Коэфф. Пуассона	Предел прочности, МПа
1	1	23.6	0.22	24.5	0.14	38,1
	2	22.6	0.12	23.8	0.13	49,4
	3	22.3	0.21	23.2	0.17	45,4
	4	25.0	0.19	26.1	0.16	45,3
	5	34.2	0.17	35.7	0.18	57,2
Среднее		25.5	0.18	26.7	0.16	47.1
Сред. квадрат.		4.4	0.03	4.6	0.02	6.9
Вариация, %		17.4	19.0	17.3	11.8	14.8
2	1	23.7	0.25	24.3	0.23	47,0
	2	19.5	0.18	21.2	0.18	43,4
	3	22.0	0.17	23.2	0.17	45,6
	4	23.0	0.16	23.6	0.16	52,3
	5	23.4	0.18	25.1	0.18	52,7
	6	25.6	0.22	27.1	0.22	68,4
Среднее		24.1	0.2	25.3	0.20	49,53
Сред. квадрат.		3.7	0.04	3.8	0.03	8,1
Вариация, %		15.4	18.8	15.1	16.7	16.4

Выводы

1. Достоверная оценка деформационных свойств горных пород по образцам кернa с применением прижимного тензометра обеспечивается при давлении прижима резиновых пластин с наклеенными тензорезисторами к боковой поверхности кернa в пределах 0.7 - 0.8 МПа.

2. Результаты многократных циклических нагружений показали, что погрешность полученных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона не превышает 1%, что свидетельствует о равномерном деформировании резиновых пластин с наклеенными тензорезисторами при выбранном усилии прижима.

3. Полученные показатели деформационных свойств доломита по результатам испытаний образцов кернa по двум разно ориентированным скважинам близки между собой, а статистические оценки погрешности их определения не превышают допустимого (не более 20%) ГОСТом коэффициента вариации. При этом для надежной оценки деформационных характеристик доломита вполне достаточно испытать не менее 5-6 образцов кернa.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.- М.:ИПК Издательство стандартов, 2004.
- Сукнев С.В. Опыт применения стандарта организации СТО 05282612-001-2013 для определения упругих свойств горных пород. // Proceeding of the International Geomechanics Conference 27 June -01 July 2016, Varna, Bulgaria. Междунар. науч. конф. "Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy". Varna, Bulgaria, 27 June-01 July 2016.-С.3-9.
- Барышников В. Д., Качальский В. Г., Лабораторные испытания деформационных свойств доломита по образцам кернa скважин. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2016. 12 междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апр. 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – Т. 3. – С. 36-39.

© В. Д. Барышников, В. Г. Качальский, 2017

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЛЯНОЙ ТОЛЩЕ ПОРОД МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

Василий Дмитриевич Барышников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 116, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

Дмитрий Васильевич Барышников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

Лидия Николаевна Гахова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, e-mail: gahoval@mail.ru

Приведены результаты экспериментально-аналитической оценки напряженно-деформированного состояния соляной толщи пород в окрестности горной выработки. Установлено упругое деформирование массива при кратковременном нагружении, что позволяет использовать метод параллельных скважин в условиях образования пластической зоны вблизи контура выработки.

Ключевые слова: математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, пластические зоны.

ON STRESS EVALUATION IN SALT ROCK THICKNESS BY PARALLEL BOREHOLE METHOD

Vasily D. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 116, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

Dmitry V. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

Lidiya N. Gakhova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, e-mail: gahoval@mail.ru

Results of experimental-analytical evaluation of the stress-strain state in salt rock thickness in the vicinity of mine workings are reported. The elastic deformation of a rock mass under short-term load is established, thus making it possible to implement the parallel borehole method under conditions of plastic zone formation in the periphery of mine working.

Key words: mathematical simulation, stress-strain state, plastic zone.

Природной напряженное состояние породного массива является основным силовым фактором при оценке устойчивости горных выработок и параметров систем разработки месторождений. При проведении горной выработки в её окрестности возникают концентрации напряжений, превышающих напряжения нетронутого массива. При высоком горном давлении, сопоставимом или превышающем прочность массива, в окрестности выработок образуются характерные зоны деформирования – упругая зона, зоны неполной и полной пластичности. Надежная оценка характера деформирования в приконтурной зоне может быть получена с использованием экспериментальных методов.

После завершения открытых работ до глубины карьера 525 м на руднике «Мир» АК «АЛРОСА» приступили к выемке подкарьерных запасов. Проектом института «Якутнипроалмаз» подземная отработка запасов осуществляется с применением слоевой системы с твердеющей закладкой под защитой предохранительного целика под водным объектом в карьере. Вмещающие породы на глубинах 550 – 700 м представлены соляной толщей с незначительными по мощности прослойками карбонатных пород.

Для оценки возможности использования метода параллельных скважин при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности капитальных горных выработок проведен начальный цикл экспериментальных исследований с применением разработанных в ИГД СО РАН программно-технических средств [1].

На рис. 1 приведена схема расположения замерной станции в сбойке N1 на гор. -310 м.

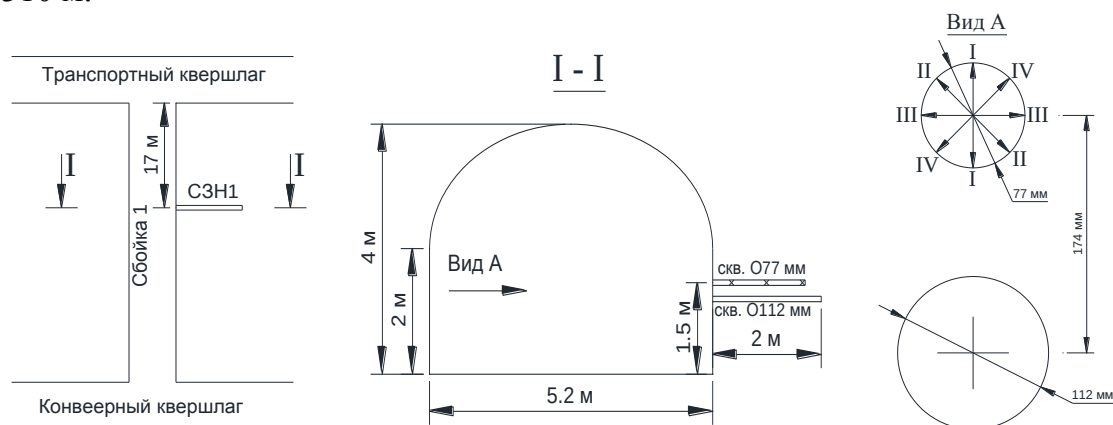


Рис. 1. Схема измерений в сбойке 1 на гор. -310 м

Разработанный в ИГД СО РАН метод параллельных скважин [2] заключается в бурении измерительной скважины с устройством в ней многокомпонентного деформометра. После стабилизации показаний деформометра возмущение исходного напряженного состояния в окрестности измерительной скважины осуществляется путем выбуривания параллельной ей возмущающей скважины. О величинах напряжений судят по регистрируемым радиальным смещениям, вызванным бурением возмущающей скважины, а о деформационных свойствах массива на участке измерений – по изменению показаний деформометра при последующем нагружении возмущающей скважины. Правомерность использования упругой расчетной модели поведения

массива для определения величин напряжений оценивается по результатам реакции массива при нагружении контура возмущающей скважины.

На рис. 2 представлены графики радиальных смещений контура измерительной скважины при ступенчатом нагружении возмущающей скважины по двум опытам на глубинах установки деформометра 0,35 и 1,65 м. Результаты оценки деформационных свойств соляного массива приведены в табл. 1. Анализ экспериментальных данных при определении упругого модуля $G_{\text{ж}} = \frac{E}{1(1-\nu^2)}$ (где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона) показал следующее.

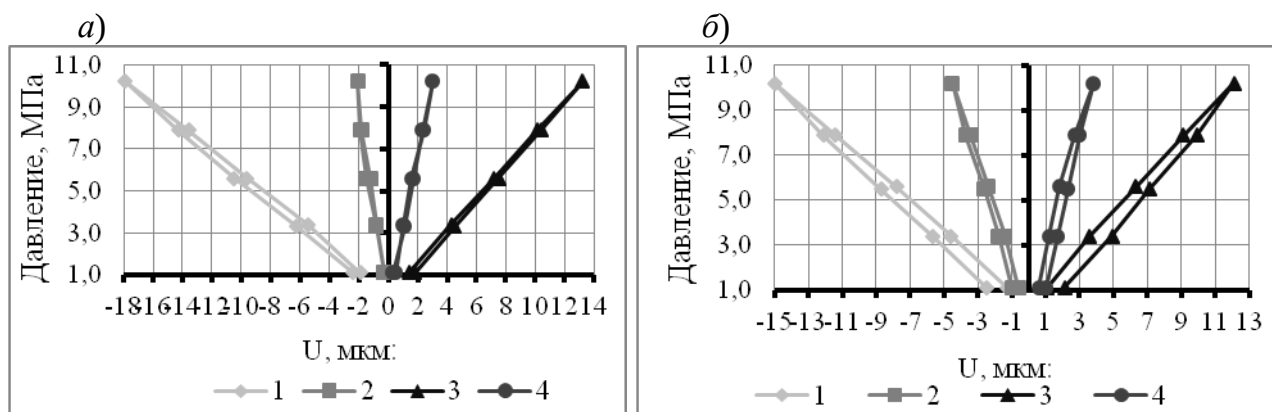


Рис. 2. Радиальные смещения контура скважины при определении модуля $G_{\text{ж}}$ на глубинах установки деформометра 0, 35 (а) и 1,65 м (б). U , мкм – смещение балок по направлениям

Таблица 1

Деформационные свойства солевого массива на участках измерения напряжений

Глубина измерения, м	N опыта	Величина нагрузки, МПа	Ветвь нагрузки		Ветвь разгрузки	
			$G_{\text{ж}} (*)$, ГПа	E^{**}	$G_{\text{ж}} (*)$, ГПа	E^{**}
0.35	1	6.4	4.2 (3.8 ÷ 4.7)	15.3	4.2 (3.8 ÷ 4.6)	15.3
	2	10.2	3.8 (3.5 ÷ 4.2)	13.8	3.9 (3.6 ÷ 4.2)	14.2
0.98	1	10.2	4.2 (3.8 ÷ 4.6)	15.3	3.9 (3.6 ÷ 4.2)	14.2
	2	10.2	4.0 (3.7 ÷ 4.3)	14.6	3.8 (3.6 ÷ 4.2)	13.8
1.65	1	10.2	4.3 (3.7 ÷ 5.0)	15.7	4.7 (4.1 ÷ 5.4)	17.1
	2	10.2	4.4 (3.8 ÷ 5.2)	16.0	4.6 (4.0 ÷ 5.4)	16.7

(*) – 90% доверительный интервал; ** – $E = 3.64 G_{\text{ж}}$ при $\nu = 0.3$

• Результаты определения упругого модуля $G_{\text{ж}}$ при нагружении возмущающей скважины свидетельствуют о корректности использования упругой, однородной и изотропной модели при пересчете деформаций контура измерительной скважины в величины напряжений на всех участках установки деформометра. Об упругость массива свидетельствует линейная зависимость деформаций от нагрузок без значительных остаточных смещений; об однородность массива без нарушения его сплошности - отсутствие нарушений контура скважины, об изотропности - хорошее согласование значений модуля $G_{\text{ж}}$ по всем измерительным направлениям

деформометра, а также по трем нагружениям на глубинах измерений при максимальном 90% доверительном интервале, 30% от значения $G_{\text{э}}$ при среднеквадратическом отклонении не более 7% (см. рис.2. табл.1).

• Результаты расчета по величине $G_{\text{э}}$ модуля упругости $E = 13,8 \div 17,1$ ГПа (табл.1) при $\nu = 0,3$ хорошо согласуются с его оценкой по образцам горных пород для соли Чарской свиты ($14,6 \div 19,6$ ГПа), приведенной в работе [4].

В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты расчета компонент и величин квазиглавных напряжений на участках измерений (азимут 310° СЗ).

Таблица 2

Глубина измерения, м	Компоненты напряжений, МПа			Главные напряжения, МПа		Угол между горизонтом и σ_2 , град.
	$\sigma_{\theta} (*)$	$\sigma_z (*)$	$\tau_{\theta z} (*)$	σ_1	σ_2	
0.35	-4.4 (0.6)	-9.7 (1.9)	-0.1 (0.3)	-4.4	-9.7	-2**
0.98	-5.0 (0.1)	-16.6(0.2)	-0.2 (0.0)	-5.0	-16.6	-1**
1.65	-5.3 (0.2)	-17.8 (0.8)	-0.5 (0.1)	-5.3	-17.8	-2**

(*) – среднее квадратичное отклонение; ** – угол откладывается от горизонта против часовой стрелки

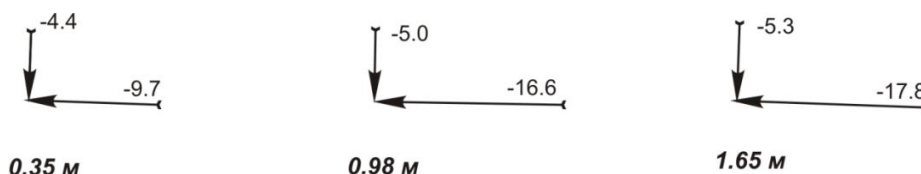


Рис.3. Направления действия и величины (МПа) квазиглавных напряжений в вертикальном сечении

Для сравнительного анализа полученных оценок НДС массива определим вертикальную составляющую напряжений из выражения: $\sigma_v = \gamma H$, где γ – объемный вес пород, H – глубина налегающей толщи. При средней объемной массе вмещающих пород $2,61 \text{ т/м}^3$ [5] вертикальное напряжение нетронутого массива составит: $\gamma H = 17,1 \text{ МПа}$. Предел прочности соли на одноосное сжатие по кернам составляет в среднем $24,7 \text{ МПа}$ [5].

Для реальной геометрии сбойки N1 коэффициенты концентрации вертикальных напряжений составили на глубинах 0,35 и 1,65 м соответственно 1,61 и 1,45. В табл.3 приведены величины вертикальной компоненты напряжений по створу измерительной скважины от контура выработки, определенные с учетом коэффициентов концентрации, рассчитанных по упругой модели в окрестности выработки (σ_v^p), и данные натурных измерений ($\sigma_v^н$). Сравнение расчетных данных и данных натурных измерений свидетельствует о значительном их расхождении.

Таблица 3

Глубина, м	0.35	0.98	1.65
σ_v^p , МПа	-27.5	-27.4	24.8
$\sigma_v^н$, МПа	-4.4	-5.0	-5.3

Заключение

1. Метод параллельных скважин и разработанные программно-технические средства его реализации позволяют определять НДС в окрестности горных выработок в соляном массиве.
2. Полученные оценки деформационных свойств соляного массива свидетельствуют о линейной зависимости радиальных смещений контура измерительной скважины при кратковременном нагружении возмущающей скважины, а полученные величины модуля упругости сопоставимы с данными лабораторных испытаний керна.
3. Результаты определения действующих напряжений в окрестности сбойки N1 показали наличие пластической зоны, границу которой можно оценить по данным измерений на глубинах, сопоставимых с размерами выработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барышников В.Д., Качальский В.Г. Автоматизированный измерительный комплекс приборов для определения напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин // ФТПРПИ. –2010. –№3.
2. Барышников В.Д., Барышников Д.В. К вопросу инструментальной оценки напряжений в бетонном массиве. –Албена. –2015.
3. Коврижных А.М., Серяков В.М., Коврижных С.А. Расчет необратимых деформаций и фронта разрушения на основе сдвиговой модели деформирования материала // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. –Новосибирск: ИГД СО РАН, 2014. – №1. –т.1. – с. 135-140.
4. Константинова С.А., Н.П. Крамсков, В.А. Соловьев. Некоторые проблемы механики горных пород применительно к отработке алмазных месторождений Якутии / Новосибирск: Наука, – 2011.
5. Коноваленко В.Я. Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии / АК «Алроса», ин-т «Якутнипроалмаз», –2012 г.

© В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, Л. Н. Гахова, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛОТАЦИОННОЙ СИЛЫ РЯДА НАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

Сергей Александрович Кондратьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. отделом комбинированных способов добычи и переработки горнорудного сырья, тел. (383)205-30-30, доп. 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Дина Владимировна Семьянова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, лаборатория обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30 доп. 166, e-mail: d.semjanova@yandex.ru

Рассмотрена собирательная способность десорбируемых форм (ДС формы) насыщенных карбоновых кислот. Под ДС формами реагента понимаются формы, способные перейти с минеральной поверхности на пузырек, то есть на границу раздела «газ-жидкость» в момент прорыва прослойки, разделяющей указанные объекты взаимодействия. Определена величина сил, действующих на жидкость в прослойке со стороны растекающейся пленки ДС форм реагента, и расход воды из прослойки.

Ключевые слова: флотация, сила флотационного реагента собирателя, насыщенные карбоновые кислоты, поверхностное давление.

DETERMINATION OF FLOTATION FORCE OF A SATURATED FATTY ACIDS RANGE

Sergey A. Kondratyev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head of Complex Mineral Mining and Processing Department, tel. (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Dina V. Sem'yanova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Post-graduate, Complex Mineral Mining and Processing Department, tel. (383)205-30-30, extension 166, e-mail: d.semjanova@yandex.ru

This paper examines collecting properties of desorption forms (DS forms) of saturated carboxylic acids. The DS forms of reagent are forms that can transfer from mineral surface to bubble, i.e. to «gas-liquid» interface in the moment of breaking layer between mentioned object of interaction. The value of force acting on liquid in layer by spreading film of DS forms of reagent and water flow rate by layer are determined.

Key words: flotation, collecting force of flotation reagent, surface pressure, saturated fatty acids.

Численно определена собирательная сила десорбируемых форм (ДС форм) ряда насыщенных карбоновых кислот. Расчет флотационной силы ДС форм для ряда насыщенных карбоновых кислот выполнялся в предположении, что основным ограничением, препятствующим образованию флотационного контакта, является прослойка жидкости, оставшаяся между минеральной частицей и пузырьком газа после ее локального прорыва. Нахождение ДС форм карбоновых кислот подтверждается

наличием многослойного покрытия на извлекаемых частицах. Нижний слой закрепляется химически. Возможна и физическая форма сорбции в результате взаимодействия сорбированных противоионов Na^+ с анионом реагента [1]. Указанный слой хорошо организован и плотно упакован благодаря гидрофобному взаимодействию углеводородных цепей. Он придает минеральной поверхности сильную гидрофобность [2]. Верхний слой формируется только на минеральной поверхности, покрытой химически или физически сорбированным реагентом, и представлен олеатом кальция, натрия и нейтральными молекулами карбоновой кислоты. Верхний слой не придает дополнительной гидрофобности минералу. Он слабо связан с минералом и легко десорбируется органическим растворителем или ультразвуковой обработкой суспензии [3].

Для определения силы использовалось решение задачи удаления жидкости из прослойки при возникновении градиента поверхностного натяжения на границе раздела «газ-жидкость» [4]. Для этого предполагали, что на минеральной грани, обращенной к пузырьку, находятся физически сорбированные ДС формы реагента. Раствор ДС форм реагента обладает низким поверхностным натяжением. После локального прорыва прослойки указанная форма сорбции реагента получает доступ к границе раздела «газ-жидкость», величина поверхностного натяжения которой практически равна поверхностному натяжению воды («свежие» пузырьки). При наличии неоднородности поверхностного натяжения возникают капиллярные силы, действующие на пленку реагента тангенциально к свободной поверхности жидкости и заставляющие ее растекаться [5]. Пленка реагента захватывает в свое движение прилегающие к ней слои жидкости и генерирует конвективное течение, получившее название конвекции Марангони.

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} \right] \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Здесь μ - коэффициент кинематической вязкости; ρ - плотность жидкости; p - давление; g - гравитационное ускорение, направленное в отрицательном направлении оси z ; вектор скорости имеет компоненты $(v_r, 0, v_z)$. Уравнения (1) -(3) были упрощены до уравнений теории смазки. Упрощение выполнялось в предположении, что отношение характерного вертикального размера (толщины слоя жидкости на минерале в начальный момент- H_0) к характерному горизонтальному размеру (например, начальный радиус пятна поверхностно-активного вещества – R_0) значительно меньше единицы.

Расчеты проводились для следующих значений параметров: $\mu = 1.052 \cdot 10^{-3}$, Па·с; $\rho = 10^3$, кг/м³; $g = 10.0$, м/с²; $D_s = 10^{-8}$, м²/с; $\sigma_w = 72.3 \cdot 10^{-3}$, Н/м; σ_m менялось в зависимости от длины углеводородного фрагмента молекул карбоновых кислот и оценивались по данным работы [6] и экспериментально; $S = \sigma_w - \sigma_m$ разность поверхностных натяжений, или сила, приходящаяся на единицу длины периметра, растекающегося пятна в начальный момент времени.

На рис. 1 приведен профиль поверхности прослойки $h(r, t)$, поверхностная концентрация реагента $\Gamma(r, t)$ и объемный расход как функции радиального расстояния на момент времени $t = 4.0 \cdot 10^{-5}$ с. Сравнение толщин h прослоек за фронтом растекающейся пленки реагента и расходов жидкости показывает, что скорость ее удаления из прослойки возрастает в следующей последовательности: гексановая, октановая, доде-

кановая, декановая (таблица). В этой же последовательности увеличивается и собирательная способность указанных карбоновых кислот. Расчетные значения собирательной силы F десорбируемых форм карбоновых кислот, найденные в предположении, что указанные силы реализуются при удалении жидкости из прослойки, адекватно характеризуют их собирательную способность, оцененную в [6].

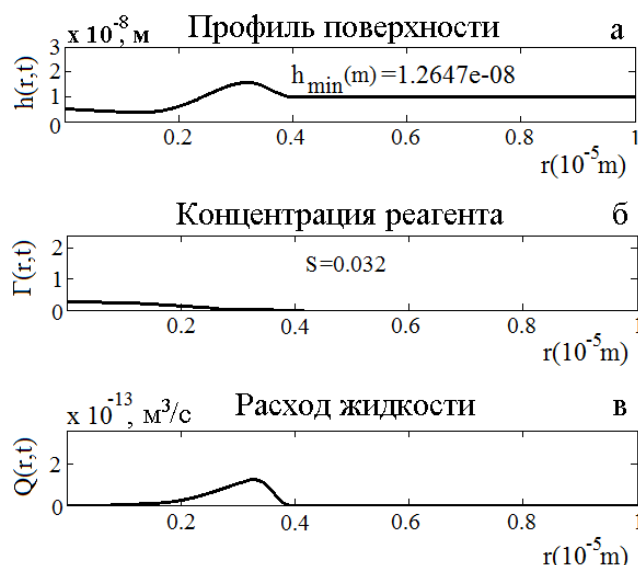


Рис. 1. Результаты расчета истечения жидкости из прослойки, обусловленного растеканием декановой кислоты:

а) форма свободной поверхности; б) концентрация реагента; в) расход жидкости как функции радиальной координаты в момент времени $t = 4,0 \cdot 10^{-5}$ с; $\sigma_m = 40,3 \times 10^{-3}$ Н/м

Область рН высокого поверхностного давления $S = \sigma_w - \sigma_m$ тетрадекановой кислоты не совпадает с областью максимальной флотированности гематита [6]. В связи с этим расчетные значения силы тетрадекановой кислоты также не будут отражать ее собирательную способность. Для формирования флотационного агрегата важна локальная величина поверхностного давления, кратковременно образовавшегося в момент прорыва прослойки, и скорость растекания производных форм реагента [7, 8]. Поэтому для длинноцепочечных реагентов необходимо учитывать снижение скорости растекания, связанное с когезией их углеводородных фрагментов. Параметр S для длинноцепочечных реагентов должен быть дополнен параметром, учитывающим скорость растекания карбоновых кислот по поверхности раздела «газ-жидкость». Скорость растекания тетрадекановой кислоты уступает скорости растекания короткоцепочечных кислот. Вследствие низкой скорости растекания кислоты, сокращается расход жидкости из прослойки и увеличивается время индукции. Поэтому собирательная способность тетрадекановой кислоты меньше собирательной способности, например, декановой кислоты.

Автор [6] делает вывод, что величина поверхностного давления пленки реагента не всегда адекватно характеризует собирательную способность карбоновой кислоты. Согласно предложенному механизму осаждение ДС форм тетрадекановой кислоты (ионно-молекулярных комплексов) приводит к увеличению плотности ее сорбции на минеральной поверхности, а после прорыва прослойки появлению высокого градиента поверхностного натяжения. Способность производных форм рассматриваемой кислоты увле-

кать в свое движение прилегающие слои жидкости незначительна вследствие низкой скорости ее растекания. Таким образом предложенный в [7, 8] механизм работы ДС форм реагента подтверждается результатами работы [6].

Таблица

Поверхностное давление S , сила флотационного реагента F , толщина прослойки h и максимальный расход жидкости Q при $r = 0,2 \cdot 10^{-5}$ м для ряда насыщенных карбоновых кислот

Parameters	Насыщенные карбоновые кислоты			
	Гексановая	Октановая	Декановая	Додекановая
$S = \sigma_w - \sigma_m$ (мН/м)	3.0	15	32.0	28.0
h (м)	$2.68 \cdot 10^{-8}$	$1.62 \cdot 10^{-8}$	$1.26 \cdot 10^{-8}$	$1.3219 \cdot 10^{-8}$
F (Н)	$7.57 \cdot 10^{-6}$	$4.57 \cdot 10^{-5}$	$9.78 \cdot 10^{-5}$	$8.6896 \cdot 10^{-5}$
$Q_{\max}$ (м ³ /с)	$1.6 \cdot 10^{-14}$	$6.8 \cdot 10^{-14}$	$1.2 \cdot 10^{-13}$	$1.097 \cdot 10^{-13}$
t_m (с)	$4.0 \cdot 10^{-5}$			

Предложенный в [7, 8] механизм подтверждает выводы работы [9] о необходимости использования во флотации «свежих» пузырьков. Высокое поверхностное натяжение «свежих» пузырьков и низкое поверхностное натяжение раствора ионно-молекулярных комплексов или ДС форм реагентов способствуют созданию высокого локального поверхностного давления в момент прорыва прослойки жидкости. Высокая скорость растекания ДС форм реагента приводит к быстрому удалению жидкости из прослойки и формированию флотационного агрегата.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ No. 15-17-10017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sivamohan R., de Donato P., Cases J. M. Adsorption of oleate species at the fluorite-aqueous solution interface / *Langmuir*, 1990, vol. 6, pp. 637 – 644.
2. Mielczarski J. A., Cases J. M., Bouquet E., Barres O., Delon J.F. Nature and structure of adsorption layer on apatite contacted with oleate solutions 1. Adsorption and fourier transform infrared reflection studies / *Langmuir*, 1993, vol. 9, pp. 2370-2382.
3. Hu J.S, Misra M., Miller J.D. Effect of temperature and oxygen on oleate adsorption by fluorite / *International Journal of Mineral Processing*, 18 (1986) 57—72
4. Kondratyev S. A., Moshkin N. P. Estimate of collecting force of flotation reagent / *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, pp. 150–156.
5. Levich V.G. *Physicochemical Hydrodynamics*, 2nd Ed., Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1962, p. 700.
6. Quast K. Flotation of hematite using C6–C18 saturated fatty acids / *Minerals Engineering*, 2006, vol. 19, pp. 582–597.
7. Kondratyev S. A. Estimation of reagents-collectors flotation activity / *Ore Dressing Treatment*, 2010, vol. 4, pp. 24–30.
8. Kondratyev S. A. Activity and Selectivity of Carboxylic Acids as Flotation Agents , *Journal of Mining Science*, 2012, vol. 48, pp. 1039–1046.
9. Finch J. A., Smith G. W. Dynamic superficial tension of alkaline dodecylamine solutions / *Journal of Colloid and Interface Science*, 1973, vol. 45, pp. 81–91.

© С. А. Кондратьев, Д. В. Семьянова, 2017

О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ КРЕПИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОАВСТРИЙСКОГО СПОСОБА РАЗРАБОТКИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ВЫРАБОТОК

Виктор Михайлович Серяков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)205-30-30, доп. 124, e-mail: vser@misd.ru

Проведено математическое моделирование процесса перераспределения напряжений в элементах крепи и в приконтурном массиве при применении новоавстрийского способа раскрытия поперечных сечений выработок. Установлены зоны концентрации растягивающих и сжимающих напряжений и их изменение по мере развития горных работ. Обсуждается влияние исходного поля напряжений на механическое состояние элементов крепи.

Ключевые слова: породный массив, выработка, напряжения, деформации, крепь, поперечное сечение, новоавстрийский метод, математическое моделирование, зоны концентрации.

STRESS STATE OF SUPPORTS WHEN USING NEW AUSTRAIN PROCESS TO ADVANCE CROSS-SECTIONS OF MINE WORKINGS

Viktor M. Seryakov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Professor, Head of Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 124, e-mail: vser@misd.ru

The mathematical simulation of stress redistribution in support members and in peripheral rock mass is implemented in the case of application of new Austrian penetration process to open cross-sections of mine workings. Zones of tension and compressive stresses and their variations with face advance are established. Influence of initial stress field on mechanical state of support members is discussed.

Key words: rock mass, mine working, stress, strain, supports, cross section, new Austrian method, mathematical simulation, concentration zones.

Строительство камерных выработок, имеющих большую площадь поперечных сечений, осуществляется в несколько этапов [1,2]. На каждом этапе проходится выработка, имеющая относительно малую площадь сечения, контур которой крепится сначала временной, затем постоянной крепью. После завершения всех проходческих и крепежных работ (раскрытия поперечного сечения выработки) образуется выработка с необходимой площадью поперечного сечения. На практике применяются несколько схем развития очистных работ: опертого свода; опорного ядра; новоавстрийский метод [3] и т.п. Последовательность проходческих работ с поэтапным формированием крепи оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние, как ее элементов, так и окружающих выработку пород [3,4].

В работах [5,6] предложен метод расчета напряжений и деформаций в элементах крепи и в приконтурном массиве с учетом последовательности работ по проходке и

креплению границ выработанного пространства. На его основе разработан комплекс программ для расчета механического состояния системы «крепь - вмещающий массив» методом конечных элементов [7,8] и проведено моделирование процесса перераспределения напряжений при применении двух способов раскрытия поперечного сечения выработки: а) с первичной отработкой подсводовой части выработки; б) с первичным формированием вертикальных элементов крепи. В настоящей статье рассмотрено напряженное состояние крепи и вмещающего массива в условиях применения новоавстрийского способа раскрытия поперечного сечения выработки.

На рис.1 показана последовательность развития горных работ и возведения элементов крепи, характерная для новоавстрийского способа разработки. После проходки на очередном этапе развития горных работ выработки малого сечения ее контур закрепляется временной крепью из набрызгбетона или податливой арочной крепью. Крепь превращает приконтурный слой в грузонесущую конструкцию, которая деформируется за счет разгрузки окружающих пород от исходных напряжений, и воспринимает на себя их большую часть. Постоянную крепь возводят после того как основной этап разгрузки массива от действующих в нем исходных напряжений закончен. Вследствие этого постоянная крепь воспринимает незначительную нагрузку и ее деформирование и нагружение происходит в основном вследствие дальнейшего развития горных работ и образования выработок малых сечений. Такая постановка задачи расчета полей напряжений в элементах крепи и в приконтурном массиве с учетом последовательности работ использована при разработке программного комплекса расчета напряженно-деформированного состояния системы «крепь-приконтурный массив».

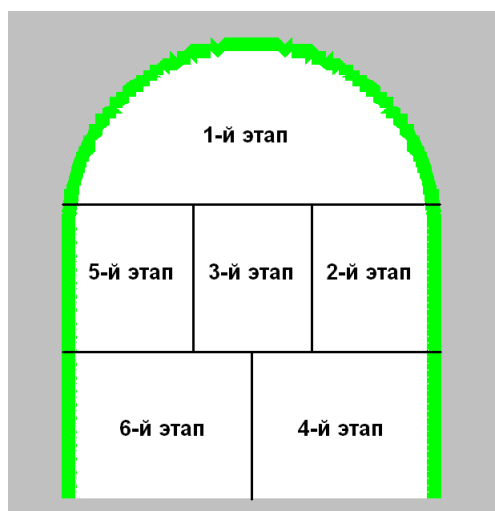


Рис. 1. Последовательность раскрытия поперечного сечения выработки при применении новоавстрийского способа разработки

Расчеты выполнены для условий плоской деформации, справедливых в случае значительных размеров выработки и элементов крепи в направлении, перпендикулярном рассматриваемому сечению массива. На боковых границах расчетной области были заданы нулевые значения горизонтальной компоненты вектора смещений u и касательной компоненты тензора напряжений τ_{xy} . Эти условия отвечают исходному напряженному состоянию массива с компонентами тензора напряжений: $\sigma_y^0 = -\rho H$; $\sigma_x^0 = -\nu \rho H / (1 - \nu)$; $\tau_{xy}^0 = 0$, и реализуются в регионах, где отсутствует тек-

тоника [9]. Здесь σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 – нормальные и касательная компоненты тензора напряжений; ρ – объемный вес пород; H – расстояние до земной поверхности. Ось Ox направлена по горизонтали, Oy — по вертикали. Верхняя граница расчетной области свободна от действия внешней нагрузки. На нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора смещений v и касательная компонента тензора напряжений τ_{xy} . Механические свойства вмещающих пород приняты следующими: модуль Юнга $E = 25000$ МПа; $\nu = 0.25$. Для материала крепи $E = 30000$ МПа; $\nu = 0.35$. Объемный вес пород равен 0.03 МН/м³.

На рис. 2 приведены изолинии главных напряжений σ_1 и σ_2 в элементах крепи и в приконтурном массиве после завершения третьего этапа раскрытия поперечного сечения выработки. Часть крепи, закрепляющая подсводовую часть выработки, деформируется вследствие проведения горных работ на втором и третьем этапах проходки и в механическом отношении соответствует освобождению границ выработок, формируемых на этих этапах, от действующих здесь нормальных и касательных напряжений.

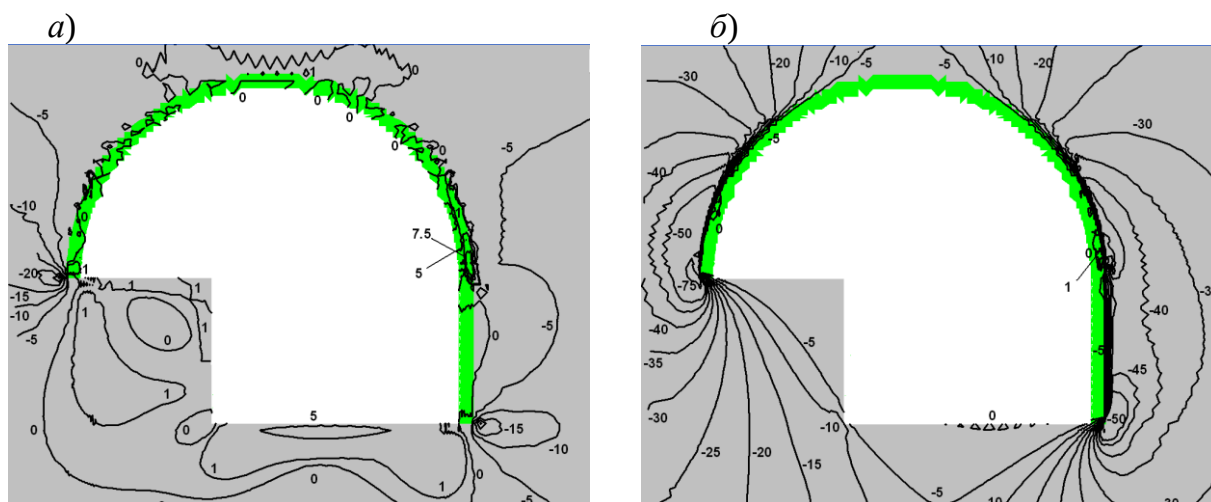


Рис. 2. Распределение в крепи и в приконтурном массиве главных напряжений σ_1 (а) и σ_2 (б) после завершения третьего этапа раскрытия поперечного сечения выработки при применении новоавстрийского способа проходческих работ

В целом крепь находится под действием незначительных напряжений. Однако обращают на себя внимание зоны крепи, в которых формируются значительные напряжения растяжения. В одной из таких зон величина напряжений превышает 7,5 МПа (рис. 2а). Ее возникновение связано со вторым этапом развития горных работ и с дальнейшим ростом уровня напряжений после выполнения третьего этапа. Во второй зоне значения растягивающих напряжений значительно ниже и они не превышают 2 МПа. Эта зона формируется после выполнения второго этапа горных работ; третий этап горных работ не оказывает существенного влияния на качественное и количественное распределение здесь напряжений. В окружающих выработку породах поведение напряжений отвечает основным закономерностям их распределения вокруг выработанных пространств с соответствующим формированием областей концентрации главных напряжений.

На рис. 3 показаны изолинии главных напряжений σ_1 и σ_2 в системе «крепь-приконтурный массив» после завершения работ по формированию и креплению вы-

работки с большой площадью поперечного сечения. Поэтапное развитие работ по проходке и креплению выработки с большой площадью поперечного сечения приводит к несимметричному распределению напряжений в крепи. Наиболее характерно это для распределения главного напряжения σ_1 (рис. 3, а). В процессе реализации пятого и шестого этапов развития горных работ в вертикальных элементах крепи, возводимых на этих этапах, формируются значительные по размерам зоны действия растягивающих напряжений. Их значения превосходят 10 МПа. В симметричных, относительно оси Ох, областях крепи, формируемых на втором и четвертом этапах горных работ зоны растяжения по размерам меньше, а уровень растяжения существенно ниже (до 2 МПа).

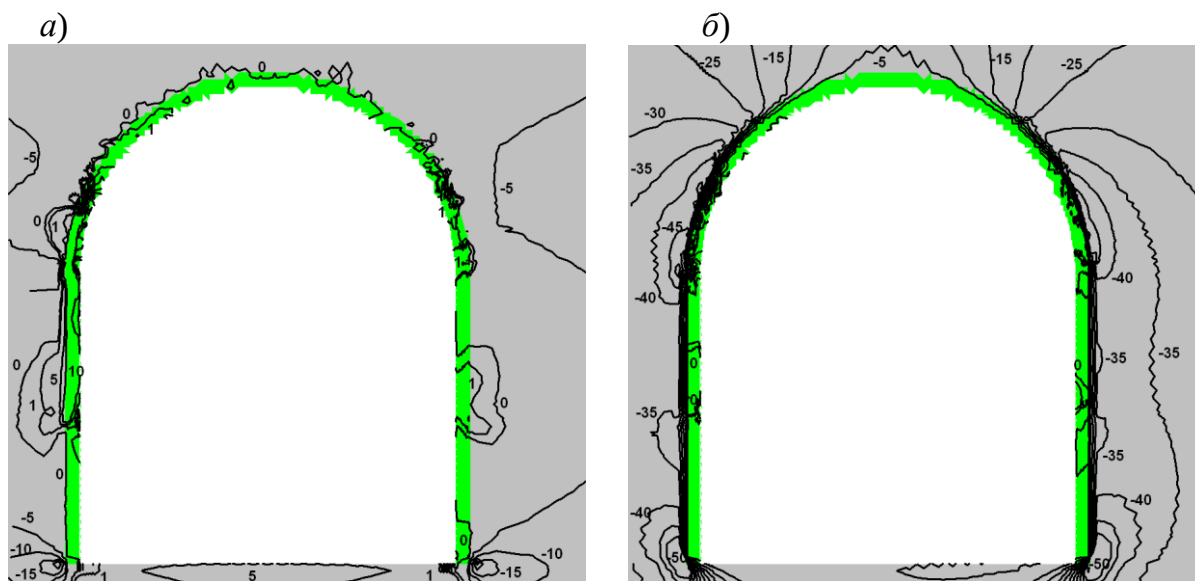


Рис. 3. Распределение главных напряжений σ_1 (а) и σ_2 (б) в крепи и приконтурном массиве после завершения горных работ по раскрытию поперечного сечения выработки при применении новавстрийского способа отработки

Таким образом, применение разработанных алгоритмов к определению напряженно-деформированного состояния крепи и приконтурных пород при использовании новавстрийского способа раскрытия поперечного сечения выработки позволяет рассмотреть характер распределения полей напряжений в крепи по мере развития работ, связанных с ее поэтапной проходкой. При проведении настоящих исследований рассмотрены поля напряжений, формируемые в крепи только за счет развития горных работ, т.е. единственным фактором нагружения системы «крепь-приконтурный массив» являются снимаемые с контура каждой выработки нормальные и касательные напряжения. Такое предположение вполне оправдано в условиях применения новавстрийского способа разработки поперечных сечений выработок. Появление в крепи значительных зон растягивающих напряжений связано с учетом последовательности разработки поперечного сечения выработки. В некоторой степени на их величины может оказать влияние условия жесткого контакта между контуром выработки и элементами крепи, принятые при постановке геомеханической задачи. Степень такого влияния можно оценить, используя на границах контакта другие условия, допускающие проскальзывание берегов контактирующих сред и их раскрытие [7].

Выводы

1. Расчет напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработки с учетом последовательности горных работ по раскрытию ее поперечного сечения оказывает качественное и значительное количественное влияние на напряженное состояние крепи.

2. Установлено, что в условиях применения новоавстрийского способа поэтапного возведения элементов крепи в их объеме формируются зоны действия растягивающих напряжений, достигающие пределов прочности материала крепи на промежуточных этапах ведения горных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Картозия Б.А., Федунец Б.И. Шахтное и подземное строительство: Учебник для вузов. Т.2. Издательство МГГУ «Горная книга». 2003. 815 с.
2. Булычёв Н.С. Механика подземных сооружений.- М.: Недра, 1994.- 278 с.
3. Протосеня А.Г., Долгий И.Е., Огородников Ю.Н. Шахтное и подземное строительство в примерах и задачах. Издательство С.-Пб. Горного института им. Плеханова. 2003. 312 с.
4. Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н. Технология строительства подземных сооружений - М., Недра, 1992, 285 с.
5. Серяков В.М. О расчете напряженного состояния крепи и приконтурных пород при поэтапной разработке поперечного сечения протяженной выработки. // ФТПРПИ, 2015, №4. С. 43-49.
6. Серяков В.М. Напряженное состояние элементов крепи при различных способах раскрытия поперечного сечения выработки в скальных массивах. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, Т.2, 2015. С. 149-152.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир. 1975, 589 с.
8. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987, 246 с.
9. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. — 488 с.

© В. М. Серяков, 2017

ДИАГНОСТИКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Сергей Владимирович Сердюков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией, тел. (913)745-30-03, e-mail: ss3032@yandex.ru

Михаил Владимирович Курленя

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник, тел. (383)217-01-95, e-mail: kurlenya@misd.ru

Рассмотрены вопросы определения напряжений в породном массиве методом направленного гидроразрыва. Приведен анализ информативности получаемых результатов при использовании в расчетных схемах давлений открытия и закрытия создаваемых трещин. Предложены пути повышения информативности определения напряжений методом гидроразрыва.

Ключевые слова: массив горных пород, метод гидроразрыва, напряженное состояние, точность оценки, скважинное оборудование

DIAGNOSTICS OF STRESS STATE OF A ROCK MASS BY THE DIRECTED HYDROFRACTURING METHOD

Sergey V. Serdyukov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head of Laboratory of Physical Methods of Influence on Rock Mass, tel. (913)745-30-03, e-mail: ss3032@yandex.ru

Mikhail V. Kurlenya

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Academician of Russian Academy of Sciences, Principal Researcher, tel. (383)217-01-95, e-mail: kurlenya@misd.ru

The authors consider evaluation of stresses in a rock mass by the directed hydrofracturing method. The sufficiency of results obtained by using opening and closing of new-formed fracturing in interpretation schemes are analyzed and reported. The ways to improve information value of stress evaluation by the hydrofracturing method are proposed.

Key words: rock mass, hydrofracturing method, stress state, estimate precision, downhole equipment.

Диагностика напряженного состояния массива горных пород является обязательным элементом инженерных изысканий при строительстве крупных подземных сооружений, плотин, атомных электростанций и др. [1-2]. Составной частью изысканий является определение напряжений, действующих в глубине породного массива. Для решения задачи обычно используют метод гидроразрыва. Основной объем изысканий выполняют в вертикальных необсаженных скважинах глубиной до 1-1.5 км, пробурен-

ных с дневной поверхности. Гидроразрыв выполняют стандартным способом, при котором в изолированный интервал скважины длиной 1-3 м нагнетают под давлением маловязкую жидкость, формируют тем самым в породном массиве трещину и по характерным точкам графика давления жидкости от времени определяют напряжения в породе. Такой подход легко применим в глубоких скважинах, не требует знания деформационных свойств горных пород для оценки их напряженного состояния.

При выполнении гидроразрыва стандартным способом получают трещину вдоль скважины (продольный тип) или под небольшим углом к ее оси в направлении максимального сжатия контура скважины вмещающими породами [3]. Давление запирания такой трещины дает напряжение в породе, действующее перпендикулярно плоскости разрыва [3]. Очевидно, что получаемой информации недостаточно для определения всех компонент напряженного состояния породного массива в пункте наблюдения.

Для увеличения числа определяемых компонент используют следующие допущения и подходы:

1) полагают, что вертикальное горное давление является одним из главных напряжений в породном массиве и равно весу вышележащих пород;

2) считают, что давление раскрытия продольной трещины зависит от концентрации напряжений на стенке скважины, и по нему можно определить напряжение, действующее вдоль плоскости разрыва перпендикулярно оси скважины.

Экспериментальные данные показывают, что вертикальное горное давление не всегда равно весу вышележащих пород, в частности, из-за складчатости пород и связанного с нею перераспределения вертикального давления (сводовые эффекты). Также установлено, что при закачке рабочей жидкости в интервал разрыва она заполняет трещину до начала ее раскрытия [4 – 5]. Из-за этого давление раскрытия трещины равно напряжению в породе, действующему перпендикулярно плоскости разрыва. Определить напряжение, действующее вдоль плоскости разрыва, не удастся. В результате, метод гидроразрыва в стандартном исполнении дает в вертикальной скважине только одну компоненту напряженного состояния – минимальное горизонтальное напряжение. Проблему малой информативности гидроразрыва решают за счет проведения гидроразрыва с использованием пластырных оболочек, препятствующих проникновению рабочей жидкости в трещину [6], комплексирования с другими методами [7], проведения гидроразрывов в нескольких скважинах различной ориентации [8]. Что касается последнего из указанных подходов, то он практически неприменим при большом удалении пункта наблюдения от дневной поверхности. Технически сложно группировать наблюдения, проводимые в нескольких скважинах, в компактной области породного массива, подлежащей исследованию.

В настоящей статье мы рассмотрим другую возможность повышения информативности гидроразрыва - создание в скважине нескольких трещин гидроразрыва различной ориентации. Ограничимся случаем вертикальной необсаженной скважины, представляющий наибольший практический интерес для инженерных изысканий. Рассмотрим две отдельные задачи: определение вертикального горного давления и максимального горизонтального напряжения.

1. Вертикальное горное давление. Чтобы определить его величину в вертикальной скважине с помощью гидроразрыва необходимо создать трещину поперек скважины. Известные способы получения таких трещин основаны на щелевых инициаторах, создаваемых струйными или механическими щелеобразователями. Отметим, что приме-

нение щелевого способа в глубоких скважинах возможно, но технически сложно, ведет к существенному удорожанию работ.

В работах [9, 10] нами предложен и исследован безщелевой способ гидроразрыва, в котором направление развития трещины поперек скважины задается без предварительного разрушения пород за счет изменения их напряженного состояния [11]. Для этого герметизаторы устройства гидроразрыва закрепляют анкерами [12]. Под действием давления рабочей жидкости на герметизаторы на контакте анкеров с горной породой возникают растягивающие касательные нагружения, способствующие формированию поперечной трещины. По давлению заклинивания P_{Sh} такой трещины можно определить значение вертикального горного давления σ_v . Влияние размеров трещины на точность определения напряжений по давлению заклинивания рассмотрено в работе [13]. При радиусе трещины 5 м и вертикальном горном давлении более 30 МПа погрешность измерений составляет менее 3%. Для протяженной поперечной трещины с достаточной для практики точностью справедливо $\sigma_v \approx P_{Sh}$.

2. Определение горизонтальных напряжений. Существует два реалистичных способа определения максимального горизонтального напряжения методом гидроразрыва:

- по данным измерения давлений раскрытия нескольких продольных трещин различной ориентации, создаваемых одноосным нагружением интервала гидроразрыва через пластырную оболочку;

- по давлению заклинивания трещины, созданной по стандартной методике гидроразрыва, и давлению ее раскрытия в отсутствии проникновения рабочей жидкости в трещину и породу.

Не останавливаясь подробно на первом способе, отметим, что известны две технологии «сухого разрыва» (sleeve fracture): метод единичной трещины или SF (single fracture) и метод двойной трещины или DF (double fracture). В методе SF [6] с помощью устройства направленного нагружения создают систему протяженных трещин различной ориентации и измеряют давления их раскрытия. В методе DF [14] скважину нагружают высоким давлением так, чтобы в интервале разрыва возникли две ортогональные трещины. В работе [15] отмечается, что в полевых условиях методом DF не удалось создать две ортогональные трещины, несмотря на успешные лабораторные испытания разработанного устройства разрыва. Отметим, что погрешность определения напряжений методами «сухого разрыва» возрастает с увеличением неравномерности внешнего поля напряжений.

Рассмотрим второй из указанных способов, в котором используются данные измерений давления заклинивания трещины гидроразрыва, созданной по стандартной методике, и давления ее раскрытия без проникновения жидкости в раскрываемую трещину.

Следует заметить, что для определения азимута полученной продольной трещины обычно используют специальные импрессионные пакеры, представляющие собой пластырную оболочку с внешним тонким мягким слоем. При нагружении интервала разрыва импрессионным пакером этот слой дает отпечаток стенки скважины. Метод очень эффективен, поскольку мягкий слой затекает в раскрываемую протяженную трещину гидроразрыва, что позволяет уверенно выделять ее след в импрессионном отпечатке на фоне нарушений шероховатой поверхности скважины.

Для снижения числа технологических операций нами предлагается совместить импрессионные исследования с проведением прессиометрических испытаний для определения не только азимута трещины гидроразрыва, но и ее давления раскрытия, а также деформационных свойств горных пород in-situ. Для этого импрессионный пакер

предлагается оснастить ранее разработанным нами трехкомпонентным измерителем деформации контура скважины [16].

В целом, предлагаемая методика диагностики напряженного состояния породного массива при инженерных изысканиях с использованием вертикальных скважин, а также в шахтных условиях выглядит следующим образом:

1) на первом этапе специальным устройством направленного гидроразрыва создают трещину поперек скважины. В процессе работ регистрируют давление заклинивания получаемой трещины по которому определяют величину вертикального горного давления в пункте наблюдений $\sigma_v \approx P_{sh}$;

2) на втором этапе стандартным устройством в интервале, примыкающем к интервалу ранее проведенного продольного гидроразрыва, проводят продольный гидроразрыв и регистрируют давление заклинивания получаемой продольной трещины P_{sv} , по которому определяют величину минимального горизонтального напряжения $\sigma_h \approx P_{sv}$;

3) на третьем этапе в скважину спускают импрессионный пакер со встроенным трехкомпонентным деформометром и измерителем угла поворота (азимута) прибора. В импрессионном пакере постепенно повышают давление, регистрируя показания деформометров. В процессе испытаний измеряют поперечные размеры скважины вдоль трех ее диаметров D_1, D_2, D_3 , развернутых друг относительно друга на 120° . Обработывая полученные данные определяют давление раскрытия трещины P_r , а также модуль Юнга и коэффициент Пуассона пород [17]. По ориентации импрессионного отпечатка следа трещины и показаниям измерителя угла поворота прибора определяют азимут трещины, дающий направление действия максимального горизонтального напряжения. Его величину вычисляют по формуле $\sigma_H = 3P_{sv} - P_r$.

Заключение. Реализация предлагаемой методики предусматривает выполнение трех спуско-подъемных операций в скважине и использование помимо стандартного устройства разрыва дополнительного устройства направленного (поперечного) гидроразрыва и модифицированного импрессионного пакера, совмещенного с трехкомпонентным деформометром оригинальной конструкции.

Предлагаемая методика диагностики напряженного состояния массива горных пород с использованием направленного гидроразрыва обеспечивает повышение информативности измерений, позволяет определять в глубоких вертикальных скважинах напряженное состояние породного массива и его упругие свойства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов С. Н., Курленя М. В. Диагностика напряженного состояния породных массивов на стадии разведочных работ и строительства горного предприятия // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1976. – С. 16.
2. Martin C. D. Characterizing in situ stress domains at the AECL Underground Research Laboratory // Canadian Geotechnical Journal. – 1990. – Т. 27. – №. 5. – С. 631-646.
3. Павлов В.А., Янкайте А.В., Сердюков С.В. Развитие метода гидроразрыва применительно к оценке напряженного состояния проницаемых горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. - №12. – С. 249-255.
4. Ito T., Igarashi A., Ito H., and Sano O. Problem for the maximum stress estimation in hydrofracturing method and its potential solution, Proc. US Rock Mech. Symp., 2005. — ARMA/USRMS 05-862 (CD-ROM).

5. Курленя М.В., Патутин А.В., Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Шилова Т.В. Лабораторные исследования направленного гидроразрыва с касательным нагружением стенок скважины //Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. -2016. -№3. – Т.1. –С.103-107
6. Serata S., Single – fracture method and apparatus for automatic determination of underground stress state and material properties // United States Patent - № 7513167 B1, Date of patent: Apr.7, 2009.
7. Мартынюк П. А., Павлов В. А., Сердюков С. В. Метод оценки напряженного состояния массива горных пород по деформационной характеристике прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2011. — № 3.
8. Cornet F. H., Valette B. In-situ stress determination from hydraulic injection test data, J. Geophys. Res., 1984, Vol. 89. — P. 11527–11537.
9. Шилова Т.В., Сердюков С.В. Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок через вмещающие породы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 5. – С. 179–186.
10. Сердюков, С. В. Технический комплекс для множественного локального гидроразрыва породного массива в необсаженных скважинах / С. В. Сердюков, Н.В. Дегтярева, А.В. Патутин, Т.В. Шилова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. -2016. -№6. – С.180-186.
11. Сердюков С. В. Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород / С. В. Сердюков, М.В. Курленя, А.В. Патутин, Л.А. Рыбалкин, Т. В. Шилова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. -2016. -№4. – С.3-11.
12. Курленя, М.В. Лабораторные исследования направленного гидроразрыва с касательным нагружением стенок скважины / М.В. Курленя, А.В. Патутин, Л.А. Рыбалкин, С.В. Сердюков, Т.В. Шилова //Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. -2016. -№3. –Т.1. –С.103-107.
13. Сердюков С. В., Курленя М.В., Патутин А.В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. -2016. -№6. – С.6-14.
14. Abou-Sayed A. S., Brechtel C. E. and Clifton R. J. In Situ Stress Determination by Hydrofracturing: A Fracture Mechanics Approach // J. Geophys. Res., 83. -1978.
15. Ito T., Sato A., Hayashi K. Laboratory and field verification of a new approach to stress measurements using a dilatometer tool // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. №38 – 2001.
16. Сердюков С.В., Дегтярева Н.В., Патутин А.В., Рыбалкин Л.А. Скважинный прецизионный dilatometer с интегрированной системой транспортирования вдоль ствола скважины // ФТПРПИ. – 2015. – № 4. – С. 198–204.
17. Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В. Определение деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважины // ФТПРПИ. – 2015. – № 4. – С. 96–102.

© С. В. Сердюков, М. В. Курленя, 2017

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОГО ДЕБАЛАНСНОГО ИСТОЧНИКА С ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ РАБОЧЕЙ КАМЕРОЙ

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. НИЦ, e-mail: sav@eml.ru

Михаил Николаевич Цупов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий инженер НИЦ, тел. (383)217-05-25, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Сформулированы требования, предъявляемые к дебалансному источнику, работающему при высоком давлении в жидкости, содержащей механические примеси. Приведены технологические особенности работы источника в скважине при добыче нефти. Дана оценка изменения величины силы лобового сопротивления источника с заполненной жидкостью внутренней камерой при размещении его в приповерхностном слое и на забое скважины.

Ключевые слова: скважинный дебалансный источник, вибровоздействие, нефть, сила лобового сопротивления.

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF THE DOWNHOLE UNBALANCED SOURCE FULL OF GUNS FLUID WORKING CHAMBER

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Mining Machinery and Geotechniques Research Center, e-mail: sav@eml.ru

Michael N. Tsupov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Leading Engineer of Mining Machinery and Geotechniques Research Center, tel. (383)217-05-25, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

The authors set forth requirements for a downhole debalance vibrosource with a working chamber filled with a liquid under bottom-hole pressure and containing mechanical admixtures. Variations in drag force of debalance component rotation versus a depth of immersion into a liquid are compared and reported.

Key words: downhole debalance source, vibroeffect, oil, drag force.

На протяжении эксплуатации нефтяных и газовых месторождений во всем мире дебит полезного ископаемого уменьшается из-за истощения месторождений, падения пластового давления, уменьшения проницаемости пласта, в частности призабойной зоны. Для решения этих проблем применяются различные способы интенсификации полезного ископаемого и очистки призабойной зоны: химический, акустический, гидравлический и прочие[1]. В РФ на промыслах успешно применяются гидроударные системы совместно с насосами ШГН, разработанные в ИГД СО РАН [2]. Однако применение данных систем в скважинах, эксплуатируемых винтовыми и электроцентро-

бежными насосами невозможно, при том, что их паркв России составляет 30%[3], а на месторождениях крайнего севера, где глубина скважин превышает 3 км, может доходить до 100%. Эти месторождения не могут быть охвачены технологией гидроударных генераторов, и поэтому необходимо создание скважинных виброисточников, работающих совместно с данными типами насосов.

При разработке генератора волнового воздействия были учтены условия, в которых будет работать источник (глубина свыше 1 км, заполнение скважины жидкостью с содержащимися в ней механическими примесями), а также проведен сравнительный анализ известных способов создания гармонических колебаний в скважине. Исследование этого вопроса показало, что наиболее оптимальным для работы в таких условиях является источник дебалансного типа (рис. 1), который обладает наибольшим КПД и может эксплуатироваться на больших глубинах.



Рис. 1. Внешний вид виброисточника

При проектировании источника были решены ряд технических и технологических вопросов:

- возможность встроить генератор в существующую технологию добычи;
- возможность не выводить скважину из эксплуатации и работать совместно с насосом;
- увеличение межремонтного периода до 6 месяцев, что соответствует минимально допустимому межремонтному периоду добывающих насосов;
- обеспечить работоспособность генератора в скважине, заполненной жидкостью с содержанием механических примесей и давлением до 300 атмосфер;
- эксплуатация без постоянного присутствия обслуживающего персонала.

Жидкость, заполняющая внутреннюю камеру источника, создает силу лобового сопротивления, препятствующую вращению дебаланса и увеличивает нагрузку на привод. Возникает задача оценить изменение величины силы лобового сопротивления источника с заполненной рабочей камерой при размещении его на поверхности и на забое скважины.

На рис. 2 схематично показано размещение дебалансного источника в приповерхностном слое воды и на глубине L . Источник вращается с одинаковой частотой и, как следствие, с одинаковой угловой скоростью – стационарный режим работы.

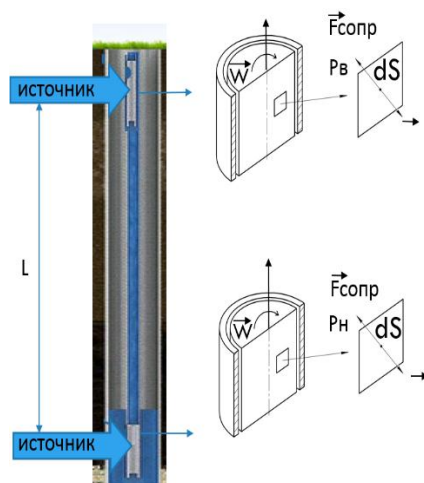


Рис. 2. Схема размещения дебаланса в скважине на разных глубинах.

Вектор силы лобового сопротивления $\vec{R}$ направлен в противоположную сторону к вектору скорости вращения $\vec{v}$, а ее величина определяется по формуле:

$$R = \zeta \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (*)$$

где $\zeta = \zeta(\text{Re}, \text{Fr}) = k \cdot \text{Re}^{-u} \cdot \text{Fr}^{-w}$, $u, w > 0$ – безразмерный коэффициент лобового сопротивления;

S – площадь проекции тела дебаланса на плоскость, перпендикулярную к направлению движения («миделево сечение»);

$T_{\text{торм}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ – энергия торможения единицы объема потока относительно трубки

тока;

ρ – плотность жидкости;

v – линейная скорость движения дебаланса в жидкости на площадке dS ;

$\text{Re} = \frac{\rho v D_r}{\eta}$ – число Рейнольдса (η – динамическая вязкость воды, $D_r = \frac{4 \cdot S}{P}$ – гид-

равлический диаметр, P – смоченный периметр поперечного сечения потока);

$\text{Fr} = \frac{v^2}{g \cdot L}$ – число Фруда (g – ускорение свободного падения, L – характерный

размер).

Для нахождения полной силы лобового сопротивления при работе дебаланса на различных глубинах необходимо учитывать, что вектор скорости, направленный по нормали к элементарной площадке, различен и изменяется от 0 на оси вращения, до v_{max} на расстоянии r – радиуса дебаланса, рис. 2. Поэтому разобьем поверхность дебаланса от оси вращения до r сеткой элементарных площадок, так как показано на рис. 2. Пусть площадь элементарной площадки равна $dS = S_i$, произведем суммирование по всем элементарным площадкам S_i с учетом скоростей, тогда получим полную силу лобового сопротивления:

$$R = \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N \zeta \cdot S_i \cdot \frac{\rho \cdot v_i^2}{2} = \frac{\zeta \cdot \rho}{2} \cdot \sum_{i=1}^N S_i \cdot v_i^2 . \quad (**)$$

Положим безразмерный коэффициент $\zeta = 1,28$ и выполним расчеты силы лобового сопротивления R в зависимости от глубины размещения источника в скважине по формуле (**) для дебаланса длиной 0,9 м и диаметром 0,095 м. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Таблица результатов расчета силы сопротивления дебаланса R , H в зависимости от частоты и глубины погружения

Глубина h , м	Плотность воды ρ , кг / м ³	R при частоте $f=1$, Hz	R при частоте $f=2$, Hz	R при частоте $f=3$, Hz	R при частоте $f=4$, Hz	R при частоте $f=5$, Hz
0	1018,6	0,8538	3,4151	7,6839	13,6603	21,3443
500	1021,05	0,8558	3,4233	7,7024	13,6932	21,3956
1000	1023,51	0,8579	3,4315	7,7210	13,7262	21,4471
1500	1025,98	0,8600	3,4398	7,7396	13,7593	21,4989
2000	1028,47	0,8620	3,4482	7,7584	13,7926	21,5510

Расчеты показали, что с увеличением глубины сила лобового сопротивления при фиксированной частоте вращения f , увеличивается не более чем на 1% (табл. 2), если в качестве опорной взять $R_{нов}$ в приповерхностном слое воды.

Таблица 2

Глубина h , м	Плотность воды ρ , кг / м ³	$R / R_{нов}$ при частоте $f=1$, Hz	$R / R_{нов}$ при частоте $f=2$, Hz	$R / R_{нов}$ при частоте $f=3$, Hz	$R / R_{нов}$ при частоте $f=4$, Hz	$R / R_{нов}$ при частоте $f=5$, Hz
0	1018,6	-	-	-	-	-
500	1021,05	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%	0,24%
1000	1023,51	0,48%	0,48%	0,48%	0,48%	0,48%
1500	1025,98	0,72%	0,72%	0,72%	0,72%	0,72%
2000	1028,47	0,96%	0,96%	0,96%	0,96%	0,96%

При использовании стандартного привода добывающего насоса двигатель и штанги будут испытывать повышенную нагрузку из-за возникающего лобового сопротивления дебаланса, что пагубно скажется на их ресурсе. На скважинах глубиной свыше 2 км возможно нарушение дебита насосов. Для решения этой проблемы разрабатывается строение источника с лобовым сопротивлением, имеющим порядок десятков ньютонов.

Вторая дополнительная задача технологического применения источника на многопластовых нефтяных и газовых скважинах - необходимость прокачки жидкости через источник, так как он располагается выше насоса. Для этой проблемы предложен ряд решений, отрабатывающихся экспериментально.

В заключении отметим, что дебалансный скважинный источник для винтовых и электроцентробежных насосов является одним из самых эффективных в данных условиях эксплуатации, а приведенные расчеты показывают возможность экспериментального определения энергетических и прочностных характеристик на лабораторных установках. Оценка силы лобового сопротивления дебалансного генератора гармонических колебаний позволяет сделать вывод о возможности его применения совместно с винтовыми насосами без замены приводных установок на более мощные.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 15-05-08824а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель». 2011. – 524 с.
2. Пат. №2490422 РФ, МПК E21B28/00 E21B43/25 Установка для импульсного воздействия на продуктивный пласт / Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Савченко А. В. - Оpubл. 20.08.2013. - Бюл. №2
3. Сайт НГФР <http://www.ngfr.ru/ngd.html?neft14>
4. Александров А.А., Григорьев Б.А. справочник «Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара». М.: -Издательство МЭИ.1999.-168с.
5. Фабрикант Н. Я., Аэродинамика, М. - 1964.

© А. В. Савченко, М. Н. Цупов, 2017

РАЗРАБОТКА ВИБРАЦИОННОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ НА СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Аркадий Николаевич Дробчик

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: a.n.drobchik@gmail.com

Работа посвящена разработке вибрационного стенда для изучения влияния упругих колебаний на скорости фильтрации газа через проницаемую горную породу. Керна горной породы помещают в специальную камеру, где контролируя всестороннее и осевое сжатие, проводят осевую фильтрацию газа. Далее помещают камеру в поле упругих колебаний, получают зависимости проницаемости от интенсивности вибрационного воздействия.

Ключевые слова: вибровоздействие, проницаемость, упругие колебания, горные породы.

DEVELOPMENT OF A VIBRATION STAND TO STUDY THE ELASTIC OSCILLATION EFFECT ON GAS FILTRATION RATE

Leonid A. Rybalkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Research Student, Junior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Arkady N. Drobchik

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: a.n.drobchik@gmail.com

The paper focuses on development of the vibration stand to study the elastic oscillation effect on gas filtration rate through permeable rocks. Rock core specimen is placed into a special chamber where axial gas filtration proceeds under control of triaxial and axial compression. Further the chamber is placed into the elastic oscillation field. The relationship of permeability vs. the vibration intensity effect is established.

Key words: vibration effect, permeability, elastic oscillations, rocks.

Повышение эффективности предварительной дегазации угольных пластов предполагает интенсификацию десорбции метана, что экономически оправданно только при использовании малоэнергетических нетепловых физических воздействий. Одним из перспективных методов является воздействие на углепородный массив вибросейсмическими колебаниями [1 – 4].

В настоящей статье рассматривается разработка вибрационного стенда для изучения влияния упругих колебаний на скорости фильтрации газа через проницаемую

горную породу. Стенд состоит из двух частей: источника колебаний и специальной камеры.

В качестве источника колебаний (рис. 1) используется пьезокерамический излучатель со следующими характеристиками:

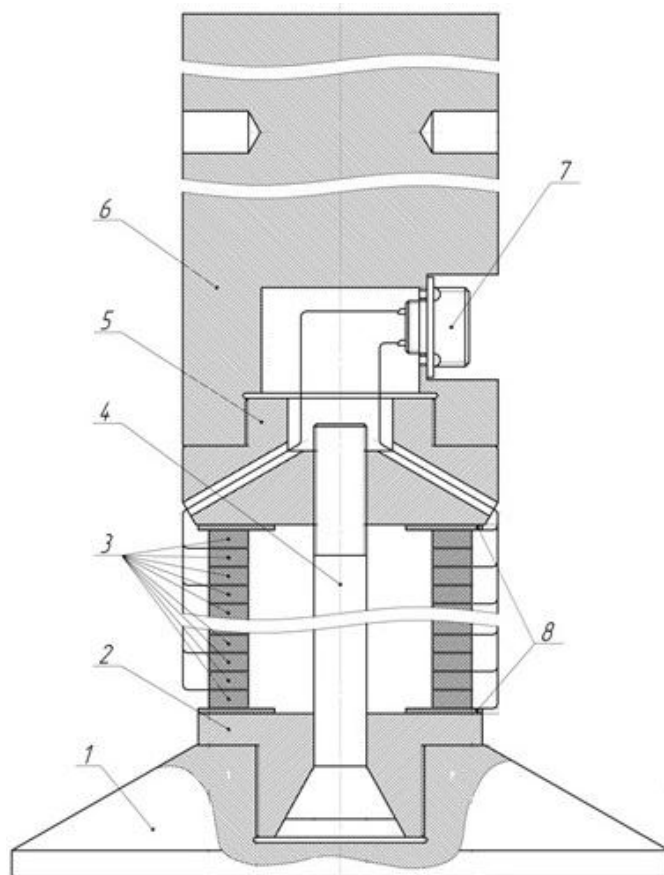


Рис. 1. Схема пьезокерамического излучателя:

- 1 – платформа излучателя; 2 – втулка; 3 – пьезокерамические элементы; 4 – штифт;
5 – втулка стягивающая; 6 – корпус с креплениями под анкер; 7 – разъем питания;
8 – кольца диэлектрические

- Расчетная амплитуда колебаний $\sim 0.1\text{mm}$ при напряжении в пике 2-4кВ
- Максимальное усилие $\sim 2000\text{-}3000\text{ кг}$
- Частоты от 200 Гц до 10 кГц
- Вес излучателя 114кг
- Вес управляющего блока 35-40кг.
- Напряжение питания 220В
- Имеется внутренний генератор
- Платформа: диаметр 25см, 50см.

Схема работы излучателя основана на колебательном контуре. Энергия курсирует из дросселя в излучатель, путем управления тиристорным мостом генератора. Далее электрическое поле поступает к набору пьезокерамических элементов, что приводит к относительным изменениям их линейных размеров. Амплитуда колебаний регистрируется геофонами.

Камера (рис. 2) позволяет осуществлять осевую фильтрацию газа через проницаемую горную породу. Исследование проницаемости горных пород позволяет получить эмпирические данные по абсолютной и фазовой проницаемости. Проведение таких исследований позволяет своевременно получить данные скорости фильтрации газа метана в уголепородном массиве, скорости оттока пластовых вод, необходимых для проведения гидравлического разрыва пласта[5 – 11], постановки барьерных экранов[12] в горных выработках. Пневматическая линия включает два газовых баллона с редукторами для контроля давления в линиях осевого сжатия, всестороннего сжатия и непосредственно осевой фильтрации. Выход газа из камеры осуществляется в мерный сосуд с водой. Изменение столба жидкости регистрируют с помощью оптических датчиков.

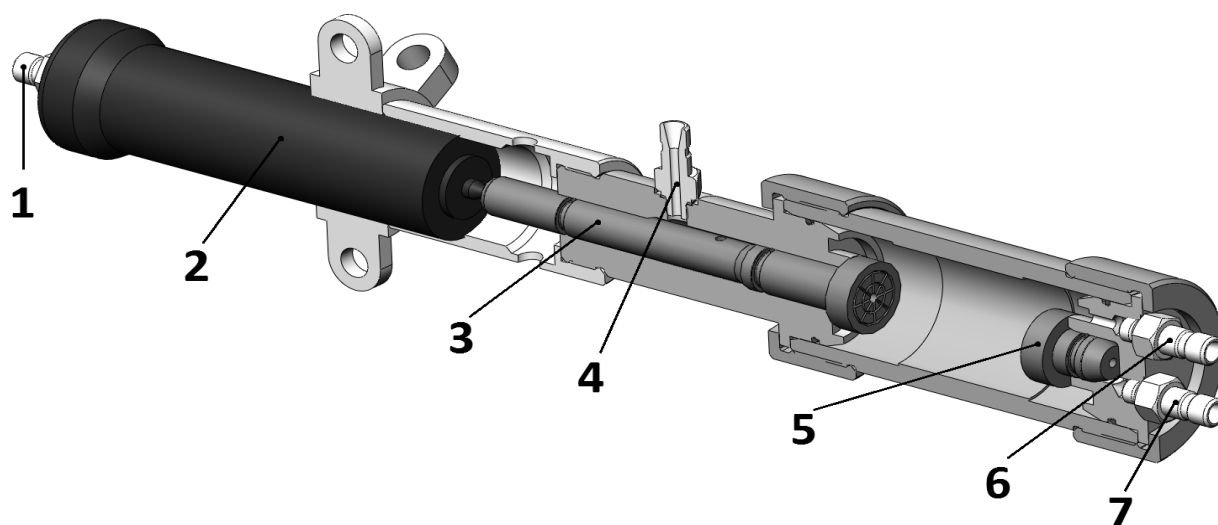


Рис. 2. Камера для осевой фильтрации газа:

- 1 – линия пневмоцилиндра; 2 – пневмоцилиндр; 3 – подвижный шток;
4 – линия выхода газа в мерный сосуд; 5 – неподвижный шток; 6 – линия всестороннего сжатия образца; 7 – линия подачи газа для фильтрации

Работа стенда осуществляется следующим образом. Камеру закрепляют на платформе излучателя таким образом, чтобы направление фильтрации совпадало с направлением деформации пьезоэлектрических элементов или же было перпендикулярно ему. Образец помещают в резиновую оболочку и закрепляют между двух штоков камеры. Задают всестороннее и осевое сжатие образца внутри камеры. На генераторе источника настраивают амплитуду и частоту импульсов. Начинают фильтрацию газа через горную породу. После того, как с помощью редуктора будет выставлено необходимое значение перепада давления в линии фильтрации, включают излучатель. Параметры вибрационного поля, приложенного к камере, контролируют с помощью геофонов. Линия выхода газа из образца находится вне поля источника и выведена в мерный сосуд с водой, к стенкам которого на равном расстоянии установлены оптические датчики. Регистрация времени фильтрации осуществляется автоматически по показаниям оптических датчиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Сердюков С.В. Реакция флюидов нефтепродуктивного пласта на вибросейсмическое воздействие малой интенсивности // ФТПРПИ. – 1999. – № 2. – С. 11–17.
2. Сердюков С.В., Рыбалкин Л.А., Азаров А.В., Дергач П.А., Сердюков А.С. Скважинный вибрационный источник для сейсмического воздействия на призабойную зону породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 5. – С. 186–204.
3. Рыбалкин Л.А., Азаров А.В., Сердюков А.С. Дебалансный источник для вибрационного воздействия на массив горных пород и результаты его стендовых испытаний // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – Т 2. – С. 151–157.
4. Рыбалкин Л.А., Сказка В.В. Численное исследование ближней зоны излучения скважинного дисбалансного вибросейсмического источника // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. Том II; Томский политехнический университет. – Томск: издательство Томского политехнического университета. – 2016. – С. 855–857.
5. Колыхалов И.В., Патутин А.В. О развитии трещин при множественном направленном гидроразрыве пласта химически активными составами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 3. – С. 63–69.
6. Леконцев Ю.М., Патутин А.В., Сажин П.В., Темиряева О.А. Комбинированное устройство для проведения направленного гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 3. – С. 90–94.
7. Сердюков С.В., Шилова Т.В., Рыбалкин Л.А. Скважинный прибор для измерения газоотдачи и фильтрационных свойств угольного пласта // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 3. – С. 192–199.
8. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В., Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В. Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 4. – С. 3–11.
9. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 6–14.
10. Сердюков С.В., Дегтярева Н.В., Патутин А.В., Шилова Т.В. Технический комплекс для множественного локального гидроразрыва породного массива в необсаженных скважинах, // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 180–186.
11. Курленя М.В., Патутин А.В., Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Шилова Т.В. Лабораторные исследования направленного гидроразрыва с касательным нагружением стенок скважины // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – Т 1. – С. 103–107.
12. Курленя М.В., Сердюков С.В., Шилова Т.В., Патутин А.В. Разработка и исследование химических составов для создания противогидратационных экранов в породном массиве // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – Т 1. – С. 108–113.

© Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик, 2017

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ПРИ ПОЖАРЕ В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Евгений Юрьевич Русский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 339, e-mail: geomining@mail.ru

Елена Леонидовна Алферова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30 доп. 179, e-mail: alferova@mosk.ru

Представлен расчет температур удаляемого через вентиляторы воздуха при пожаре в тоннеле метрополитена вблизи вентиляционной камеры. Исследован вопрос прочности узлов вентиляторов при воздействии высоких температур от пожара.

Ключевые слова: метрополитен, аварийный режим, пожар, осевой вентилятор, прочность, надежность.

ANALYSIS OF AXIAL FAN DURABILITY IN SUBWAY TUNNEL FIRE

Evgeny Yu. Russky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 339, e-mail: geomining@mail.ru

Elena L. Alferova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: alferova@mosk.ru

The authors calculated temperature range of air circulated through fans under conditions of subway tunnel fire nearby the fan chamber. The durability of fan sections under high fire temperature effects is investigated.

Key words: subway, emergency mode, fire, axial fan, durability, reliability.

В России действуют шесть метрополитенов, и еще 2 строятся. Метрополитен, как сложный технический объект подвержен авариям, в том числе пожарам. От устойчивой работы вентиляционного оборудования зависит безопасность работы всего метрополитена, и, особенно, при возникновении аварийных режимов, связанных с задымлением и пожарами, что способствует оперативному спасению пассажиров и работе спасателей.

На уже существующих станциях в большинстве случаев используются устаревшие морально и технически осевые вентиляторы серии ВОМД-24 [1, 2] (рис. 1).

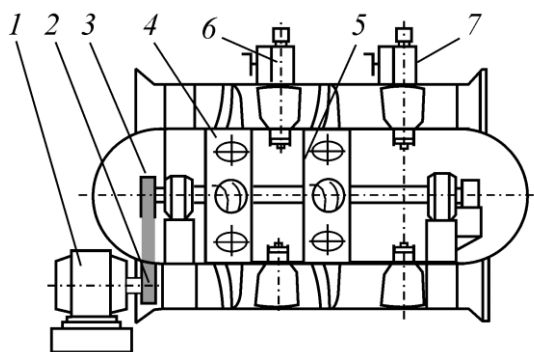


Рис. 1. Компоновочная схема вентилятора ВОМД-24:

- 1 – приводной электродвигатель; 2, 3 – шкивы ременной передачи;
4, 5 – рабочее колесо 1-й и 2-й ступени соответственно; 6 – направляющий аппарат;
7 – спрямляющий аппарат; 8 – редуктор с муфтой

Для анализа аварийных режимов работы вентиляции, обеспечивающие безопасность путей эвакуации людей с аварийного участка, необходимо решить следующие задачи:

1. провести расчет температуры пожарных газов при движении их по тоннелю от горящего поезда до места дымоудаления;
2. рассмотреть режим работы вентиляторов при обтекании их потоком удаляемых нагретых пожарных газов.

Рассмотрим ситуацию горения головного вагона, ближнего к перегонной вентиляционной камере (рис. 2), т.к. в этом случае температуры газо-воздушной смеси, удаляемой из тоннеля, будут иметь наибольшие значения. В вентиляционной камере параллельно установлены два вентилятора.

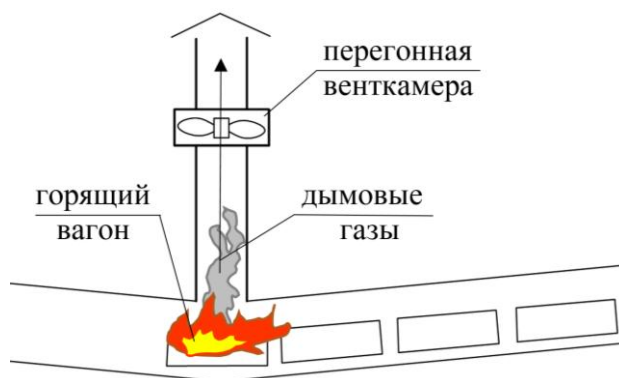


Рис. 2. Дымоудаление при возгорании крайнего вагона поезда

Моделирование процесса горения для получения динамики температур газо-воздушной смеси, проходящей через вентиляторы, производится методом конечных элементов [3-5]. Геометрическая модель тоннеля и примыкающей к нему перегонной вентиляционной камеры создавалась на основе работы [6], скорость выгорания горючих материалов рассчитывалась по экспериментальным данным работы [7].

Скорость выгорания вагона составляет 1 м/мин [8], следовательно, один вагон полностью выгорит за 20 мин, считая, что очаг возгорания находится с торца вагона.

Динамика температур удаляемой из тоннеля газо-воздушной смеси в сечении шахты венткамеры перед вентиляторами представлена на рис. 3.

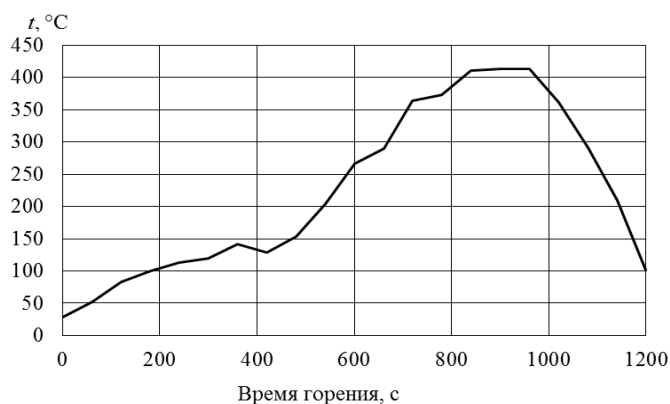


Рис. 3. Динамика температур удаляемой из тоннеля газо-воздушной смеси

Рассмотрим влияние пожара в тоннеле на НДС (напряженно-деформированное состояние) узлов вентилятора ВОМД-24 на примере лопаточного узла. В соответствии с ГОСТ 11004-84 «Вентиляторы шахтные главного проветривания. Технические условия», среднеарифметический радиальный зазор между лопатками и корпусом осевых вентиляторов должен быть в пределах 0.001 – 0.003 номинального диаметра рабочего колеса.

Конструктивно листовая лопатка представляет собой неразборную сварную конструкцию, содержащую одну листовую лопасть (рис. 4), размещенную на поворотном основании, выполненные из магниевого сплава (предел текучести $\sigma_t = 320$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 450$ МПа).

На лопатку действуют инерционные и аэродинамические нагрузки, соответствующие частоте вращения ротора 375 об/мин (39.3 рад/с) и углу установки лопаток $\theta = 40^\circ$ в сторону увеличения углов атаки. Аэродинамические нагрузки составляют 5 % от инерционных сил [9], поэтому в расчете их можно не учитывать.



Рис. 4. Лопатка вентилятора ВОМД-24

Анализ НДС лопатки проводился методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Полученные картины НДС элементов лопатки для нормальных условий (температура среды 20 °С) представлены на рис. 5-6, для случая пожара в тоннеле на рис. 7-8. В качестве расчетных напряжений представлены эквивалентные напряжения по Мизесу [10].

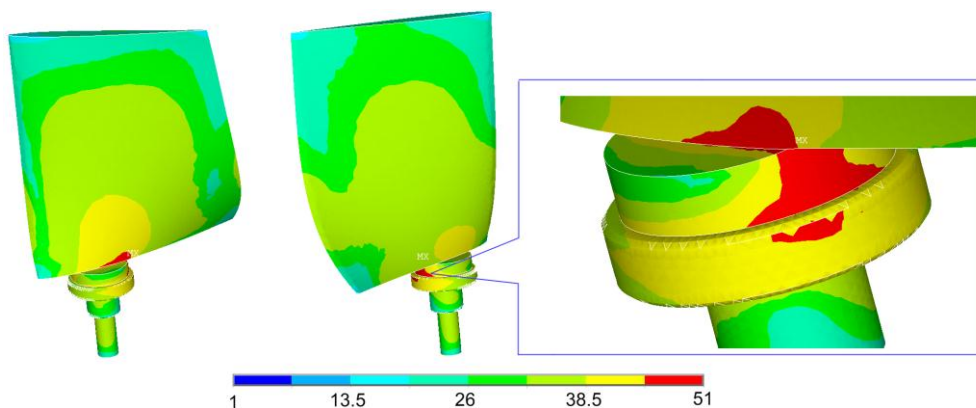


Рис. 5. Распределение напряжений в лопаточном узле, МПа

Из рис. 5 видно, что максимальные напряжения возникают в месте соединения лопасти с поворотным основанием. Максимальные напряжения достигают 51 МПа. Коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} = \frac{320}{51} = 6.3$$

где $\sigma_T = 320$ МПа – предел текучести материала лопатки.

Допускаемый запас – 2 [9]. Таким образом, НДС лопатки находится в безопасном состоянии.

Расчет показывает, что радиальное удлинение верхней кромки лопасти составляет 1.4 мм.

Таким образом, для рабочего колеса диаметром 2400 мм, максимально возможный допустимый зазор составляет $0.003 \cdot 2400 = 7.2$ мм, при этом расчетное радиальное удлинение составляет не более $(1.4/7.2) \cdot 100\% = 19.4\%$ от допустимого зазора.

На рис.7-8 представлены картины распределения НДС для случая пожара в тоннеле в соответствии с графиком изменения температур по рис. 3 (для максимального значения температур).

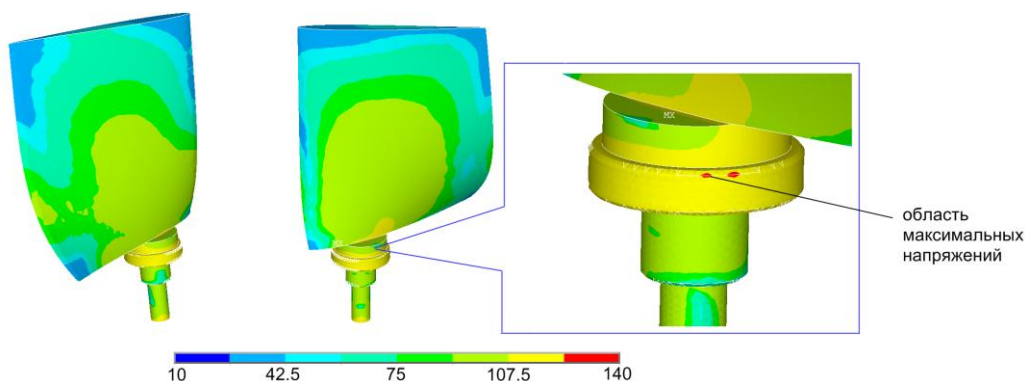


Рис. 7. Распределение напряжений в лопаточном узле, МПа

Максимальные напряжения достигают 140 МПа. Коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{\sigma_r}{\sigma_{\max}} = \frac{320}{140} = 2.3$$

Допускаемый запас – 2. Таким образом, НДС лопатки находится в безопасном состоянии, но практически по нижнему пределу. При наличии каких-либо дефектов лопатки может произойти разрушение.

Радиальное удлинение конца лопасти составляет 2.1 мм, или не более 29.2 % от допустимого зазора.

Выводы

Моделирование процесса горения поезда для получения динамики температур газо-воздушной смеси, проходящей через вентиляторы, показало значительное увеличение температуры проходящего через вентилятор воздуха. Вследствие высокой температуры возникающие напряжения в узлах вентилятора превышают напряжения в стандартных условиях в три раза, что приводит к неработоспособности лопаточных узлов вентилятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красюк А.М. Влияние возмущений воздушного потока от поршневого действия поездов на тоннельные вентиляторы метрополитенов / Красюк А.М., Русский Е.Ю., Попов Н.А // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – №2. – С. 144-153.
2. Красюк А.М. Динамика и прочность сдвоенных листовых лопаток осевых вентиляторов / Красюк А.М., Русский Е.Ю. – Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 7.
3. Лугин И.В. Тепломассообменные процессы при горении поезда в однопутном тоннеле метрополитена / И.В. Лугин, Е.Л. Алферова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 7. – С. 324-332.
4. Адеев А.А. Динамика температуры пожарно-дымовых газов в тоннеле метрополитена при горении поезда / А.А. Адеев, И.В. Лугин // Известия ВУЗов. Строительство. – 2012. – №10 (646). – С. 59-66.
5. Алферова Е.Л. Тепломассообменные процессы при горении поезда в однопутном тоннеле метрополитена / Е.Л. Алферова, И.В. Лугин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (108). – С. 16-20.
6. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Цодиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 568 с.
7. Ильин В.В. Необходимое время эвакуации / В.В. Ильин // Борьба с пожарами в метрополитенах: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1992. – С. 13-31.
8. НПБ 109-96. Вагоны метрополитена. Требования пожарной безопасности. – Введ. 1997-01-01.
9. Левин А.В. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин / А.В. Левин, К.Н. Боришанский, Е.Д. Консон. – Л.: Машиностроение, 1981.

© Е. Ю. Русский, Е. Л. Алферова, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КЕРНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ГРАНИТА, ОБРАБОТАННЫХ ПОТОКОМ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Сергей Александрович Кондратьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. отделом комбинированных способов добычи и переработки горнорудного сырья, тел. (383)205-30-30, доп. 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Виктор Иванович Ростовцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доп. 167, e-mail: benevikt@misd.nsc.ru

Олег Римович Кулагин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий конструктор, тел. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Борис Борисович Сиволап

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий инженер, тел. (383)334-88-80, e-mail: bor.nsk.ru@mail.ru

Исследовано изменение механических свойств гранита после обработки образцов его керна ускоренными электронами. Определены предельная прочность при одноосном нагружении, статические и динамические модули упругости и коэффициенты Пуассона в зависимости от величины поглощенной образцами дозы. Показано, что в результате обработки образцов керна гранита изменяются его деформационно-прочностные характеристики: прочность и модуль упругости, скорости продольных и поперечных волн. Модификация механических свойств содержащего гранит минерального сырья при обработке ускоренными электронами открывает перспективы для создания эффективных, энергосберегающих технологий рудоподготовки и переработки комплексных руд и техногенного сырья сложного состава.

Ключевые слова: природное и техногенное минеральное сырье, гранит, прочность, деформация, акустика, упругие волны, обработка ускоренными электронами, рудоподготовка.

INVESTIGATION INTO STRAIN-STRENGTH PROPERTIES OF GRANITE CORE SPECIMENS UNDER ACCELERATED ELECTRON TREATMENT

Sergey A. Kondratiev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head of Complex Mineral Mining and Processing Department, tel. (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Victor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory for Mineral Beneficiation and Technological Ecology, tel. (383)205-30-30, extension 167, e-mail: benevikt@misd.nsc.ru

Oleg R. Kulagin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Design Project Leader, tel. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Boris B. Sivolap

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Leading Engineer, tel. (383)334-88-80, e-mail: bor.nsk.ru@mail.ru

Under investigation is alteration of granite properties after treatment of its core specimens by accelerated electron beam. The ultimate strength under uniaxial load, static and dynamic elasticity modules and Poisson's ratios are determined in terms of a dose of accelerated electron radiation adsorbed by granite specimens. It is demonstrated that core granite specimens treated with accelerated electrons tend to alter their deformation-strength characteristics, namely, strength, elasticity modulus, longitudinal and transverse wave velocity. Modification of mechanical properties of granite-containing mineral materials by accelerated electron radiation enables to develop perspective efficient energy-saving ore-pretreatment processes and technological schemes to process complex ores and technological materials.

Key words: natural and technogenic mineral raw materials, granite, strength, deformation, acoustics, elastic waves, accelerated electron treatment, ore pretreatment.

В последние годы для направленного изменения свойств минералов широко используются радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные воздействия на них. И если раньше эти методы рассматривались как экзотические, то в связи с началом выпуска промышленных электрохимических кондиционеров пульпы, плазмотронов, линейных ускорителей, ультразвуковых генераторов можно говорить о реальном внедрении новых экологически безопасных технологий в процессах первичной переработки труднообогатимых руд и угля сложного вещественного состава [1]. Как показано в ряде работ [2 – 5], предварительная энергетическая обработка минеральных комплексов позволяет не только снизить затраты на измельчение, но и значительно повысить извлечение и качество концентратов. Высокая эффективность энергетических методов в процессах обогащения подтверждается исследованиями ученых Канады, Германии, Японии, ЮАР.

В настоящей работе приведены результаты выполненных в ИГД СО РАН исследований по комплексному изучению деформационно-прочностных свойств керновых образцов гранита, обработанных пучком высокоэнергетических электронов. Граниты являются наиболее важными породами земной коры. Исследования гранитов представляют интерес, так как с этой горной породой связаны месторождения таких полезных элементов, как Sn, W, Mo, Li, Be, B, Rb, Bi, Ta, Au.

Экспериментальные исследования свойств гранита осуществлялись сотрудниками лаборатории ОПИ и ТЭ и ЦКП ГГГИ с помощью комплекса оборудования ИГД СО РАН для испытаний на разрушение при одноосном нагружении с определением акустических характеристик керновых образцов указанной горной породы по методике, приведенной в [6].

Обработка специально подготовленных керновых образцов гранита осуществлялась пучком ускоренных электронов на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН в соответствии с заданными дозами при энергии электронов 2.4 МэВ.

Основные результаты исследований по влиянию обработки ускоренными электронами гранита на его механические и акустические свойства приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1.

Изменения основных деформационно-прочностных характеристик исследованных образцов гранита (табл. 1, 2) свидетельствуют о модификации его структуры под действием обработки потоком ускоренных электронов. Об этом же можно сделать вывод с учетом анализа керновых образцов после разрушения, показанных на рис. 1.

Таблица 1

Результаты механического и динамического тестирования кернов гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

№ образца	Величина поглощенной дозы, кГр	Размер образца, ØхН, мм	Механические свойства			Динамические свойства	
			Предел прочности, МПа	Упругие статические характеристики		Атмосферные условия	
			Одноосное сжатие	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
2	0	29,5х61,0	68,33	13,19	0,19	32,01	0,20
5	5	29,6х56,9	67,98	9,34	0,19	30,29	0,27
8	10	29,6х60,0	35,08	7,04	0,16	37,98	0,26
9	15	29,6х60,0	57,53	10,34	0,20	37,49	0,26
14	20	29,6х60,0	86,29	6,12	0,17	32,75	0,25

Анализ данных табл. 1 показывает, что обработка потоком ускоренных электронов кернов гранита изменяет его механические и динамические свойства. Увеличение поглощенной дозы до 10 кГр приводит к снижению предела прочности на сжатие с 68,33 до 35,08 МПа, а дальнейшее увеличение дозы до 20 кГр – к повышению предела прочности на сжатие. При этом изменяются модули деформации и упругости, а также коэффициент Пуассона. Если без обработки его значение составляет 0,20, то при поглощенной дозе 10 кГр – 0,26.

Анализ данных табл. 2 показывает, что в результате воздействия ускоренными электронами изменяются и акустические свойства гранита. С увеличением величины поглощенной дозы до 20 кГр скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются. Для исходного образца зерна гранита скорости продольных и поперечных волн равны 3747 и 2287 м/с, для обработанного при дозе 5 кГр образца они соответственно равны 3543 и 2142 м/с. При дозе 20 кГр они равны 3886 и 2222 м/с. Необходимо отметить, что для обработанных потоком ускоренных электронов это соотношение составляет 1,654÷1,749, против 1,638 для необработанного кернового образца гранита.

Результаты определения акустических свойств керновых образцов гранита,
обработанных потоком ускоренных электронов

№ образца	Величина поглощенной дозы, кГр	Размер образца, ØхН, мм	Название породы	Атмосферные условия			
				Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
2	0	29,5х61,0	Гранит	3747	2287	32,01	0,20
5	5	29,6х56,9	Гранит	3543	2142	30,29	0,27
8	10	29,6х60,0	Гранит	4054	2376	37,98	0,26
9	15	29,6х60,0	Гранит	3905	2339	37,49	0,26
14	20	29,6х60,0	Гранит	3886	2222	32,75	0,25

Таким образом, выполненные исследования по комплексному изучению деформационно-прочностных свойств керновых образцов гранита показали, что в результате их обработки пучком высокоэнергетических электронов изменяются механические, динамические и акустические характеристики: предел прочности на одноосное сжатие и модуль упругости, скорости продольных и поперечных волн.

Установленная на примере гранита возможность его разупрочнения при воздействии ускоренными электронами может быть использована с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего породную основу в виде гранита, и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.



Рис. 1. Фотографии образцов керна гранита после разрушения:

2 – исходный образец; 5, 8, 9 и 14 – образцы керна, обработанные потоком ускоренных электронов при дозах 5, 10, 15 и 20 кГр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В.А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения // Горный журнал. – 2015. – № 7. – С. 29 – 37.
2. Чантурия В.А., Вайсберг Л.А., Козлов А.П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. – 2014. – № 2.
3. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Научные основы и перспективы промышленного использования энергии ускоренных электронов в обогатительных процессах // Горн. журн. – 1995. – № 7. – С. 53 – 57.
4. Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И., Коваленко К.А. Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ. – 2014. – № 5.
5. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. 2007. №3. С. 107–128.
6. Исследование деформационно-прочностных характеристик керновых образцов известняка, обработанных потоком ускоренных электронов / С. А. Кондратьев, В. И. Ростовцев, О. Р. Кулагин, Б. Б. Сиволап // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 142–146.

© С. А. Кондратьев, В. И. Ростовцев, О. Р. Кулагин, Б. Б. Сиволап, 2017

РАСЧЕТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПОПЕРЕЧНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕЩИН ФЛЮИДОРАЗРЫВА ПЛАСТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛОМ

Игорь Владимирович Колыхалов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-54, e-mail: ikolykhalov@mail.ru

Петр Александрович Мартынюк

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)335-96-54, e-mail: martinjuk@ngs.ru

В осесимметричной постановке теории упругости численно исследован процесс последовательного развития поперечных к скважине трещин множественного флюидоразрыва при нагнетании пластического материала. Проанализировано влияние на параметры развивающихся трещин и их траектории вязкости разрушения породы, расстояния между трещинами, величины внешнего поля сжатия, расхода и предела текучести пластического материала. Проведено сравнение полученных результатов с расчетами для множественного гидроразрыва с использованием низковязких жидкостей.

Ключевые слова: множественный гидроразрыв пласта, осесимметричная трещина, пластический материал, вязкость разрушения.

COMPUTING SUCCESSIVE DEVELOPMENT OF AXISYMMETRICAL TRANSVERSE HYDROFRACTURE SYSTEM UNDER PLASTIC MATERIAL INJECTION

Igor V. Kolykhalov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)335-96-54, e-mail: ikolykhalov@mail.ru

Peter A. Martynyuk

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Researcher, tel. (383)335-96-54, e-mail: martinjuk@ngs.ru

The axi-symmetrical statement of elasticity theory is employed to study numerically successive development of transverse-to-hole multiple hydrofractures under injection of a plastic material. The researchers analyzed the effects of inter-fracture distance, external compression field, consumption and yield limits of a plastic material on fracture evolution and path parameters. The experimental results are compared with calculated data on multiple hydrofracturing with the use of low-viscosity liquids.

Key words: multiple bed hydrofracturing, axisymmetrical fracture, plastic material, failure viscosity.

Основная часть мировых запасов разведанных углеводородов сосредоточена в месторождениях с низкопроницаемыми, слабодренируемыми, неоднородными и рас-

члененными коллекторами. Множественный гидроразрыв пласта с поперечными к скважине трещинами является одним из высокоэффективных методов повышения продуктивности скважин и увеличения темпов отбора углеводородов за счет изменения проницаемости пород-коллекторов. Суть метода заключается в бурении длинных горизонтальных скважин и создании системы из высокопроницаемых поперечных трещин. Максимальная эффективность данного метода достигается, если получающиеся трещины дисковые и расстояние между ними равно радиусу дренирования. Это условие не всегда выполнимо, возможны искривления трещин и их пересечения. На геометрию развивающейся трещины существенное влияние оказывает наличие вблизи искусственно созданных или естественных трещин [1-2], а также характер нагружения трещины, который зависит от свойств рабочего флюида. Поэтому выбор оптимального расстояния между трещинами и рабочей жидкости является важной задачей при проектировании гидроразрыва. В работе рассматривается последовательное развитие криволинейных осесимметричных трещин флюидоразрыва, когда в качестве рабочего флюида используется пластический материал.

Постановка задачи. Имеется неограниченное упругое тело, сжатое на бесконечности максимальными напряжениями $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = p$, действующими ортогонально оси Oz , и напряжениями интенсивностью q , действующими вдоль оси Oz . На расстоянии h друг от друга вдоль оси Oz , которая совпадает с осью горизонтальной скважины, находятся N зародышевых дисковых трещин радиусом r_0 . Поинтервальный гидроразрыв состоит в том, что все N трещин последовательно прорастают до заданного размера и заполняются проппантом. Их размеры и раскрытия в процессе проведения дальнейших гидроразрывов остаются неизменными, следовательно, сохраняются неизменными дополнительные поля напряжений, порожденные ими. Первая трещина развивается в однородном поле напряжений и будет иметь форму эллипсоида с радиусом R_0 (рис. 1.) и раскрытием в центре $2U_0$, которое определяется закаченным в трещину количеством проппанта.

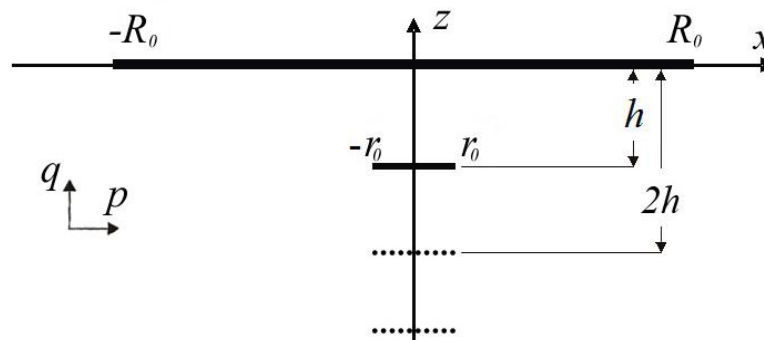


Рис.1. Начальное расположение трещин в сечении плоскости $y = 0$

Граничные условия на берегах k -ой трещины в дополнительных напряжениях:

$$\sigma_n = -p_k(s, t) - \sigma_{n0} - \sum_{m=1}^{k-1} \sigma_{nm}(s, t) = -p_k(s, t) - \sigma_k(s, t) = -\Delta p_k(s, t), \quad (1)$$

$$\tau_s = -\tau_{s0} - \sum_{m=1}^{k-1} \tau_{sm}(s,t) = -\tau_k(s,t),$$

где σ_{n0} , τ_{s0} - нормальные и касательные напряжения от внешнего поля сжатия; $\sigma_{nm}(s,t)$, $\tau_{sm}(s,t)$ - дополнительные напряжения, вызванные раскрытой m -ой имеющейся трещиной; s - длина дуги по меридиану трещины, t - время.

Для получения приближенного решения, где в качестве рабочего флюида используется пластический материал, принимается гипотеза А.М. Линькова - пропорциональность эффективных нормальных напряжений, действующих на берегах трещин, их нормальным смещениям [3]. С учетом такого предположения система уравнений для нахождения $\Delta p_k(s,t)$, $U_k(s,t)$, $R_k(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta p_k(s,t) = p_k(s,t) + \sigma_k(s,t) &= \frac{E}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{U_k(s,t)}{R_k(t)}, \\ \frac{\partial p_k(s,t)}{\partial s} &= -\frac{\tau_0}{U_k(s,t)}, \\ q_0 &= \frac{dV_k}{dR_k} \cdot \dot{R}_k(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где E - модуль упругости среды, ν - коэффициент Пуассона, $U_k(s,t)$ - полураскрытие трещины, τ_0 - предел текучести пластического материала, который нагнетается в трещину, V_k - объем трещины, q_0 - расход пластического материала.

Из первых двух уравнений (2) получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial \Delta p_k(s,t)}{\partial s} - \frac{\partial \sigma_k(s,t)}{\partial s} = -\frac{\pi \tau_0 E}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{\Delta p_k(s,t) R_k(t)} \quad (3)$$

для нахождения $\Delta p_k(s,t)$, решение которого должно удовлетворять условию $\Delta p_k(0,t) = P_0(t)$. $P_0(t)$ - давление в центре трещины при котором выполняется условие роста трещины $K_I = K_{IC}$, где K_I - коэффициент интенсивности напряжений на кромке трещины, а K_{IC} - вязкость разрушения.

Все расчеты развития трещин, представленные в настоящей работе, проводились с помощью численных программ, разработанных по методу разрывных смещений [4]. Для определения напряженного состояния упругого пространства с осесимметричными трещинами их поверхность разбивалась параллелями и меридианами на дислокационные площадки, раскрытия и сдвиги берегов которых описываются векторами Бюргерса. Чтобы найти компоненты векторов Бюргерса строится система линейных уравнений из условия выполнения граничных условий на трещине. Последние определяются в результате решения уравнения (3). Коэффициенты такой системы рассчитываются с использованием формул Пича – Келлера [5], выражающих компоненты тензора напряжений через смещения на дислокационных площадках. Решение системы уравнений позволяет определить искомое напряженное состояние упругого про-

странства вокруг осесимметричных трещин. Более подробно поэтапный алгоритм расчета развития осесимметричных трещин описан в работе [6].

Анализ результатов. В качестве величины, характеризующей кривизну k -ой трещины, введем параметр $\Delta_k = |z_k(R_0) - (k-1)h|$, равный её отклонению от прямолинейного распространения при $x = R_0$. Анализ расчетов показал, что на отклонение трещин, Δ_k , наибольшее влияние оказывают раскрытие имеющихся трещин $2U_0$, предел текучести пластического материала τ_0 , разность давлений, действующих вдоль и поперек трещин на бесконечности $\Delta P = q - p$ и расстояние между трещинами h . Влияние вязкости разрушения породы K_{IC} на изменение Δp_k заметно только при малых значениях R_k , что незначительно влияет на Δ_k . Например, изменение K_{IC} с $0,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ до $2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ приводит к уменьшению Δ_2 на $\approx 0,5\%$, Δ_5 на $\approx 1\%$. Расчеты, представленные далее в работе, проводились при следующих параметрах: $\nu = 0,3$, $E = 2,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $K_{IC} = 2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, $q = -38,5 \text{ МПа}$, $p = -39,5 \text{ МПа}$, $R_0 = 60 \text{ м}$, $2U_0 = 0,008 \text{ м}$. На рис. 2 показано влияние расстояния h между трещинами на отклонение Δ_k для различных видов закачиваемого флюида: идеальной жидкости и пластического материала. Цифрами обозначены порядковые номера трещин. Полученные зависимости для разных трещин подобны между собой. В общем случае использование пластического материала способствует уменьшению отклонения по сравнению с идеальной жидкостью.

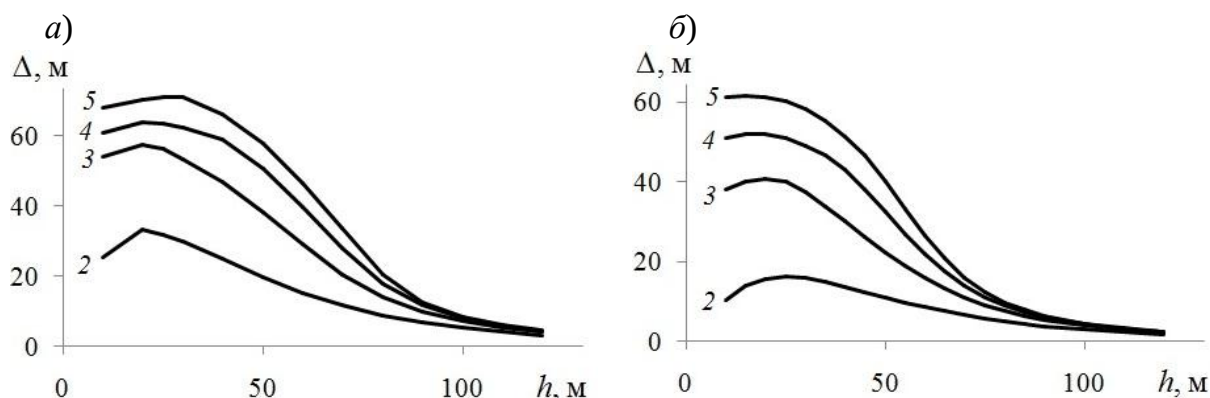


Рис. 2. Влияние расстояния h на отклонение Δ_k последовательно создаваемых трещин:

а) закачиваемая жидкость идеальная: $p_k(s, t) = p(0, t)$; б) рабочий флюид пластический, $\tau_0 = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}$

На рис. 3, а представлены зависимости отклонения трещин от τ_0 для $h = 30 \text{ м}$. Маркерами слева обозначены отклонения для идеальной жидкости. Заметим, что при увеличении величины τ_0 от 0 до $0,0025 \text{ МПа}$ наблюдается существенное (на 80%) уменьшение отклонения Δ_2 и дальнейшее увеличение τ_0 слабо влияет на уменьше-

ние Δ_2 . Для других трещин подобная зависимость не сохраняется. Например, Δ_5 уменьшается только на 50%. Расчеты для различных раскрытий имеющихся трещин $2U_0$ позволили определить влияние этого параметра на отклонение трещин Δ_k . Такие зависимости для $\tau_0 = 2,4 \cdot 10^{-4}$ МПа приведены на рис. 3, б.

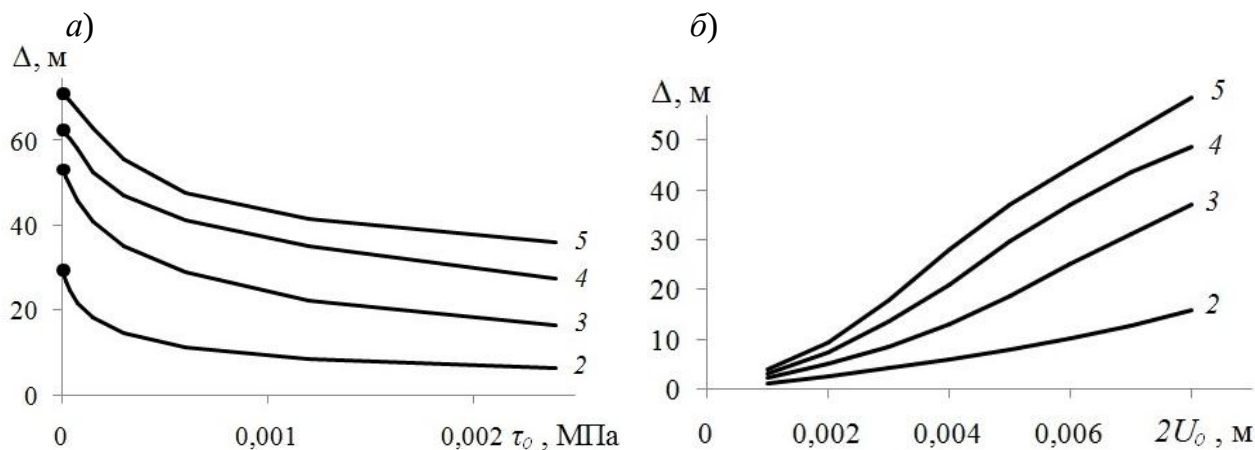


Рис. 3. Влияние предела текучести пластического материала τ_0 (а) и раскрытия имеющихся трещин $2U_0$ (б) на отклонение Δ_k последовательно создаваемых трещин

Заключение

Разработана схема численного моделирования развития криволинейной осесимметричной трещины флюидоразрыва пластическим материалом в зоне воздействия уже существующих трещин. Проведена серия расчетов последовательного развития пяти трещин для различных параметров задачи. Выявлены параметры, изменение которых влияет на отклонения развивающихся трещин, что может быть использовано при проектировании множественного гидроразрыва пласта с поперечными к скважине трещинами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салимов О.В., Насыбуллин А.В., Салимов В.Г. Влияние множественных трещин в дальней зоне на успешность операций гидроразрыва пластов // Нефтепромысловое дело. – 2010. – №10. – С. 24-27.
2. Сметанников О.Ю., Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Шустов Д.В. Численная модель развития трещины при повторном гидроразрыве пласта // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 208-218.
3. Линьков А.М. Численное моделирование течения жидкости и продвижения трещины гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2008. – №1. – С. 26-46.
4. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. -М: Мир, 1987. - 328 с.
5. Peach M., Koehler J.S. The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them // Physical Review. – 1950– No.3– Vol. 80.
6. Шер Е.Н., Колыхалов И.В. Определение форм трещин при поинтервальном гидроразрыве продуктивного пласта // ФТПРПИ.-2014.-№6.- С. 70-78.

© И. В. Колыхалов, П. А. Мартынюк, 2017

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОИСТЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Александр Михайлович Коврижных

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)205-30-30 доп. 147; Новосибирское высшее военное командное училище МО РФ, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, зав. кафедрой общепрофессиональных дисциплин, e-mail: amkovr@mail.ru

Ольга Михайловна Усольцева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, зав. ЦКП ГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Сергей Александрович Коврижных

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (383)205-30-30, доп. 147, e-mail: amkovr@mail.ru

Павел Александрович Цой

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsky@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, главный специалист, тел. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

Основная задача теоретического и экспериментального исследования состояла в установлении зависимости прочности цилиндрических образцов горных пород со слоистой структурой от угла напластования в условиях осевого сжатия с боковым давлением. Испытания образцов проводились на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802. Для неоднородных и анизотропных материалов предложен критерий разрушения, который вполне удовлетворительно согласуется с данными опытов.

Ключевые слова: анизотропия, слоистость, предел прочности, критерий Кулона-Мора, разрушение, метаморфизм горных пород.

COMPUTING LIMIT STRESSES IN LAMINATED AND ANISOTROPIC ROCKS

Alexander M. Kovrizhnykh

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Leading Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 147; Novosibirsk Higher Military Command Academy, the Ministry of Defence, 630117, Russia, Novosibirsk, 49 Ivanov St., Head of General Professional Disciplines Department, e-mail: amkovr@mail.ru

Olga M. Usol'tseva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of The Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical, and Geodynamic Measurements, SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Sergei A. Kovrizhnykh

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Engineer, tel. (383)205-30-30, extension 147, e-mail: amkovr@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, 20 Karl Marx prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Main Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

The basic objective of the theoretical and experimental research work is to establish the relationship between strength of cylindrical rock specimens of laminated structure and lamination angle under axial compression complicated with lateral thrust. The rock specimens were tested at INSTRON 8802 servo-hydraulic press. The new-proposed criterion for failure of heterogeneous and anisotropic materials is in satisfactory compliance with experimental data.

Key words: anisotropy, ultimate strength limit, Coulomb-Mohr criterion, failure, rock metamorphism.

Одним из основных допущений, обычно принимаемых в классических теориях пластичности и разрушения, являются предположения об изотропии и однородности материала. Отличительной особенностью пластической деформации в кристаллах является ее анизотропия. Известно, что сдвиги и вызываемое ими упрочнение происходят ориентированно в некоторых кристаллографических плоскостях по определенным кристаллографическим направлениям, поэтому по мере роста величины пластической деформации анизотропия проявляется наиболее выражено [1]. Это в действительности наблюдается во многих случаях необратимого деформирования металлов и горных пород, происходящих при обработке металлов давлением (прокатка, прессование, волочение, ковка), либо в процессе метаморфизма горных пород (твердофазное минеральное и структурное изменение горных пород под воздействием температуры и давления в присутствии флюида). Таким образом, при высоких механических напряжениях структурные элементы вместо беспорядочной ориентировки в поликристалле приобретают текстуру, связанную с главными направлениями пластических деформаций, что и обуславливает анизотропию механических свойств материалов за пределом упругости.

1. О механической модели разрушения. Анализируя имеющиеся в литературе многочисленные экспериментальные исследования различных авторов, можно с уверенностью утверждать, что как для пластичных, так и для хрупких материалов возникновение пластических деформаций следует связывать с критерием Кулона – Мора [2]:

$$\max_n \left[|\tau_n| + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \right] = C, \quad (1)$$

где C – прочностная постоянная, ϕ – угол внутреннего трения, n – нормаль к площадке, на которой действуют касательное и нормальное напряжения τ_n и σ_n . Разрушение происходит в результате сдвига по предельным плоскостям, составляющим с

направлением максимального касательного напряжения угол $\varphi/2$. Для пластичных металлов условие (1) при $\varphi=0$ соответствует критерию текучести Треска – Сен-Венана. Характеристики материала φ и C могут быть определены по результатам двух опытов. Пусть σ_c – предел прочности (пластичности) при одноосном сжатии. При совместном действии осевого сжатия и бокового давления $\sigma_3 = -\sigma^*$, $\sigma_1 = \sigma_2 = -p$. Если из опыта в момент разрушения известны значения σ^* и p , то из (1) можно определить:

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma^* - \sigma_c - p}{\sigma^* - \sigma_c + p}, \quad C = \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \sigma_c. \quad (2)$$

Учитывая (2), определим соотношение между прочностными параметрами и боковым давлением [2]:

$$\sigma^* = \sigma_c + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} p. \quad (3)$$

Рассмотрим осевое сжатие образцов при постоянном боковом давлении $\sigma_3 = -\sigma^*$, $\sigma_1 = \sigma_2 = -p$ (схема нагружения Кармана, рис. 1). Пусть $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$, где σ_3 является наибольшим сжимающим напряжением.

Сначала предположим, что цилиндрический образец (рис. 1, а) изготовлен из одного изотропного и однородного материала, имеющего коэффициент сцепления $C = k$ и угол внутреннего трения φ . По критерию Кулона – Мора (1) для рассматриваемого напряженного состояния плоскость разрушения будет проходить через 2-е главное направление и ось t , которая составляет с направлением 1 угол $\pi/4 + \varphi/2$ (рис. 2). Нормаль n к оси t составляет с осью 1 угол $\psi = \pi/4 - \varphi/2$.

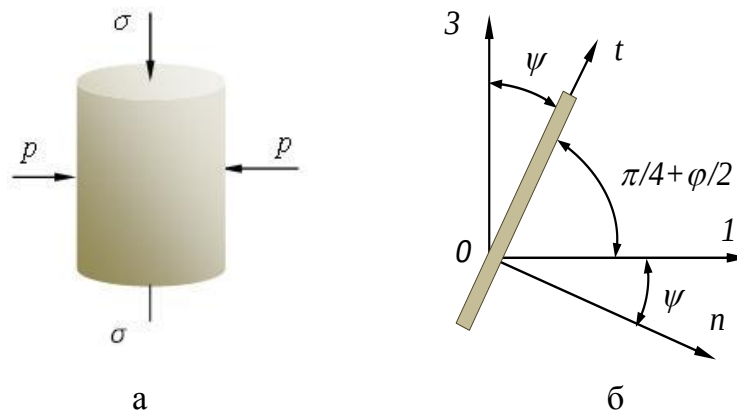


Рис. 1. Схема нагружения цилиндрического образца (а);
схема к критерию Кулона-Мора (б)

Теперь рассмотрим неоднородный цилиндрический образец, состоящий из прочного и слабого материалов. Слабый слой имеет меньший коэффициент сцепления $C = k_c < k$, а углы внутреннего трения у этих материалов, в общем случае, могут отличаться, т. е. $\varphi_c \neq \varphi$. На рис. 1, б приводится один слабый слой. Пусть ось

t направлена вдоль слоя, а ось n перпендикулярно t . Рассмотрим тензор напряжений в прямоугольной системе координат (n, t) , связанной с направлением слоистости:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi = -\frac{\sigma - p}{2} + \frac{\sigma + p}{2} \cos 2\psi, \\ \tau_{nt} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\psi = \frac{\sigma - p}{2} \sin 2\psi.\end{aligned}\quad (4)$$

Запишем условие прочности Кулона – Мора для слабого слоя, направленного по оси t . Учитывая (4) и критерий (1) определим предельное осевое напряжение для слабого слоя:

$$\sigma^* = \frac{[\sin(2\psi + \varphi_c) + \sin \varphi_c] p + 2k_c \cos \varphi_c}{\sin(2\psi + \varphi_c) - \sin \varphi_c} \quad (5)$$

Осевая прочность для основного материала определяется из (3).

2. Экспериментальные исследования. Основная задача исследования состояла в том, чтобы определить закономерности изменения прочностных свойств образцов искусственного материала и металевролита со слоистой структурой в зависимости от угла напластования при их нагружении одноосным и объемным сжатием. Состав материала и программы испытаний подробно описаны в [3]. Угол напластования составлял $\Psi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$.

Проведены опыты на цилиндрических образцах (длина 60 мм, диаметр 30 мм) при одноосном сжатии с боковым давлением: 3 и 6 МПа для искусственного материала; 6 и 12 МПа для металевролита. Экспериментальные и расчетные зависимости предела прочности σ^* от угла напластования ψ представлены на рис. 2а-в. Результаты опытов при одноосном сжатии изображены темными кружками ($\bullet$), при объемном сжатии для двух значений бокового давления – светлыми кружками и крестиками ($\circ, \times$). Результаты расчетов для соответствующих давлений изображены сплошной, штриховой и пунктирной линиями.

Расчеты осевой прочности проводились в предположении, что для каждого из слоев угол $\varphi=0$, а коэффициенты сцепления k_c и k определялись по результатам обработки опытных данных, приведенных на рис. 2.

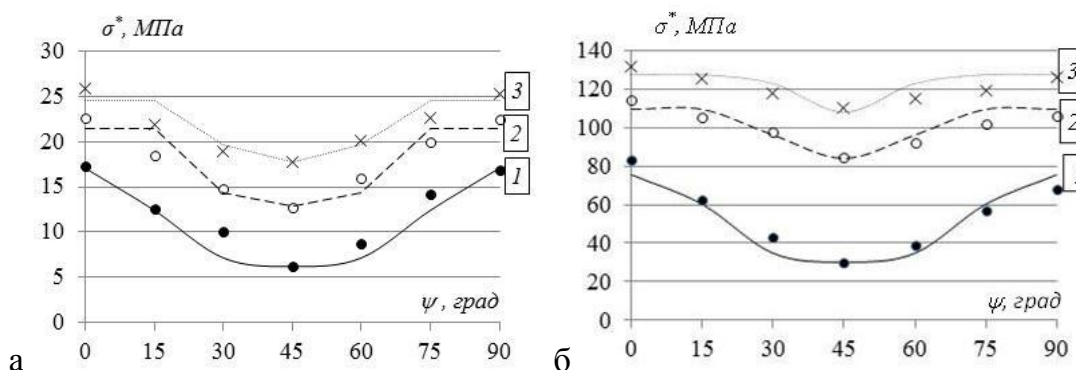


Рис. 2. Результаты расчетов и данные опытов для искусственного материала(а) и металевролита (б)

Таблица

Значения коэффициентов сцепления k_c и k

	Искусственный материал			Металевролит			Сланец		
p , МПа	0	3	6	0	6	12	0	6	12
k , МПа	8,5	9,2	9,2	38	52	58	29	59	67
k_c , МПа	3,1	4,9	5,9	15	39	48	11	29	37

Для слоистых и анизотропных материалов предложен сдвиговый критерий прочности, в котором в зависимости от ориентации направлений главных осей напряжений по отношению к направлениям слоистости или анизотропии, применяются критерии разрушения Кулона - Мора с разными прочностными параметрами для разных слоев и плоскостей анизотропии. Анализ расчетных и экспериментальных зависимостей предельных напряжений от угла напластования в опытах на осевое сжатие с боковым давлением показывает вполне удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Экспериментальная часть исследования выполнена на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов /Я.Б. Фридман. – М: Машиностроение, 1974. – 472 с.
2. Коврижных А.М. О жесткопластической модели деформирования и разрушения горных пород / А.М. Коврижных // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2003. – № 2. – с. 15-29.
3. Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Влияние структуры слоистых горных пород и геоматериалов на деформационно-прочностные свойства при растяжении и объемном сжатии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 4. – С. 49–54.

© А. М. Коврижных, О. М. Усольцева,
С. А. Коврижных, П. А. Цой, В. Н. Семенов, 2017

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА НА ПРОЦЕСС УПЛОТНЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Самуил Яковлевич Левенсон

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией вибротехники, тел. (383)205-30-30, доп. 312, e-mail: lev@misd.nsc.ru

Людмила Ивановна Гендлина

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)205-30-30, доп. 317, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Алексей Васильевич Морозов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)205-30-30, доп. 168, e-mail: alex02@ngs.ru

Представлены результаты исследования процесса уплотнения сыпучего дисперсного материала вибрационным способом. Установлено влияние статического нагружения и амплитудно-частотной характеристики уплотняющего рабочего органа на плотность компакта материала.

Ключевые слова: дисперсный материал, вибровозбудитель, режим вибровоздействия, плотность компакта, амплитуда колебаний.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE ACTUATOR VIBRATION MODE ON CONSOLIDATION OF A GRANULAR MATERIAL

Samuil Ya. Levenson

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 312, e-mail: lev@misd.ru

Lyudmila I. Gendlina

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)230-05-05, extension 317, e-mail: gen@misd.ru

Aleksey V. Morozov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 168, e-mail: alex02@ngs.ru

The data on investigation into consolidation of a granular dispersed material under vibration effect are presented. It is established the effect of static loading and amplitude-frequency characteristics of a tamping active member on density of a compact material.

Key words: dispersed material, vibration exciter, vibration mode, compact density, oscillation amplitude.

В настоящее время сыпучие дисперсные материалы широко используются в технологических процессах разных отраслей промышленности. Для достижения требуемых эксплуатационных показателей и характеристик они подвергаются уплотнению. Процесс уплотнения материала является ответственной операцией, качество выполнения которой влияет на долговечность и надежность всего изделия и, как следствие,

на эффективность использования вкладываемых средств, что является наиболее важным на фоне увеличения стоимости энергоресурсов, вызывающего повышение цен на все виды сырья и готовую продукцию.

Несмотря на многообразие методов и технических средств [1–2], используемых для уплотнения, получить упаковку с максимально возможной плотностью при сравнительно невысоких энергетических затратах не удаётся.

Одним из эффективных и сравнительно легко осуществимых способов уплотнения является вибрационный, но для его развития требуется более глубокое изучение процесса деформирования геоматериалов при воздействии внешних вибрационных нагрузок. В Институте горного дела СО РАН проводятся исследования, связанные с решением этой задачи. Здесь разработан способ уплотнения мелкодисперсных и порошковых материалов в замкнутом объёме, новизна которого защищена патентом РФ [3].

Одной из особенностей мелкодисперсных материалов является ярко выраженная зависимость реологических характеристик от параметров вибрации. При воздействии на материал даже незначительными вибрационными нагрузками коэффициент внутреннего трения и сцепление между частицами материала изменяются [4, 5]. Это свойство дисперсных сред позволяет при правильном выборе режимов вибрационного воздействия не только увеличить эффективность процесса уплотнения, но и снизить его энергоёмкость.

Экспериментальные исследования процесса уплотнения дисперсного материала вибрационным способом выполнялись с целью оценки влияния характеристик вибровоздействия на плотность получаемого компакта.

Исследования проводились на стенде (рис. 1), включающем емкость 1 для размещения сыпучего материала и самоходное вибрационное устройство 2, которое обеспечивает деформирование сыпучих сред одновременно статическими и динамическими (вибрационными) нагрузками.

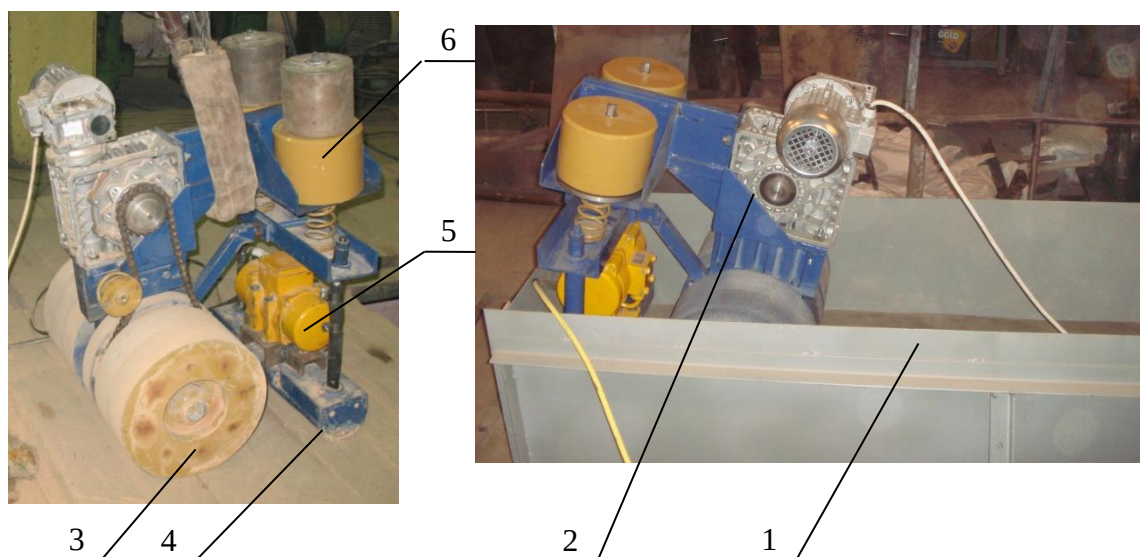


Рис. 1. Стенд для исследования процесса уплотнения дисперсного материала:

1 – емкость для размещения сыпучего материала; 2 – самоходное вибрационное устройство;
3 – каток; 4 – виброблок; 5 – вибровозбудитель

Статическое нагружение на обрабатываемый материал осуществляется катками 3, которые одновременно являются и механизмом передвижения. Динамические

нагрузки создаются виброблоком 4, а характер его колебаний – инерционным вибро-возбудителем 5.

Для обеспечения стабильной работы и постоянного контакта рабочего органа виброблока с обрабатываемым материалом в процессе уплотнения используются при-грузки 6, массу которых можно изменять.

При проведении экспериментов емкость заполнялась сыпучим материалом, тол-щина уплотняемого слоя составляла 180 ...200 мм. Самоходное вибрационное устройство устанавливалось в емкость, и включался механизм передвижения.

Плотность полученного компакта характеризуется динамическим модулем упру-гости, который измерялся портативным измерителем усадки грунта HMPLFG. Уско-рение колебаний, передаваемых в уплотняемую среду, измерялось с помощью пьезо-датчика, сигнал с которого усиливался и передавался на персональный компьютер.

Используемый в экспериментах инерционный вибровозбудитель с преобразова-телем частоты генерирует круговую вынуждающую силу, величина которой зависит от статического момента дебалансов и частоты их вращения. Были проведены экспе-рименты, в процессе которых изменялся один из этих параметров при постоянном другом, результаты в виде графиков показаны на рис. 1. Зависимость 1а получена при изменении частоты в диапазоне 28 ...66 Гц, зависимость 1б – 33 ... 47 Гц.

Как следует из графиков (рис. 2), плотность дисперсного материала при вибро-уплотнении существенно зависит от ускорения колебаний, передаваемых сыпучей среде, причем доминирующее значение имеет частота. При повышении частоты виб-рационного воздействия динамический модуль упругости уплотняемого материала растет с большей скоростью (зависимости 1а, 1б), чем при увеличении вибровоздей-ствия за счет амплитуды колебаний (зависимости 2а, 2б).

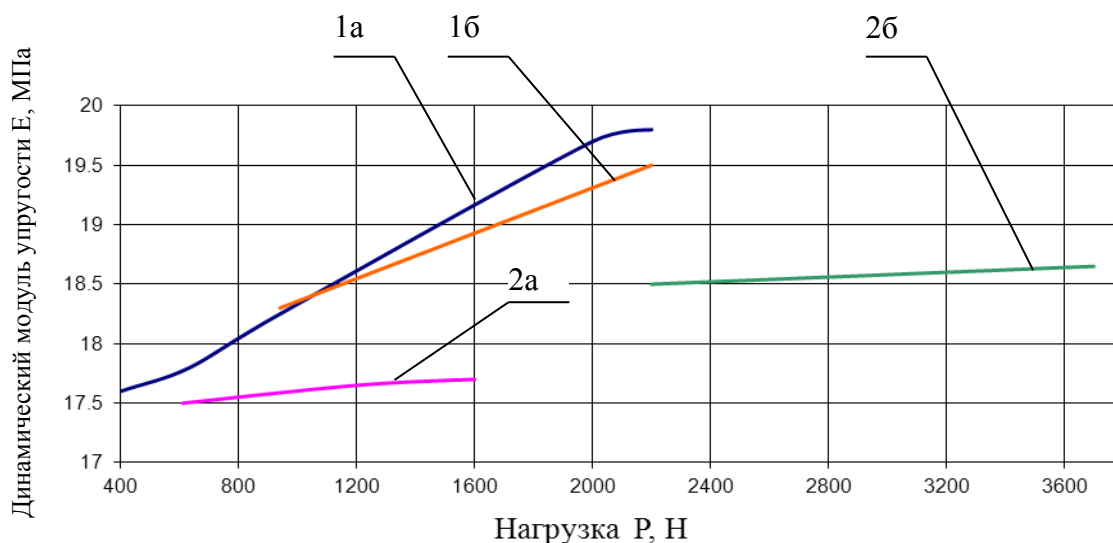


Рис. 2. Зависимость динамического модуля упругости дисперсного материала от вибрационной нагрузки: нагрузка изменяется за счет частоты: 1а – при статическом моменте $m\Gamma=0,01265$ кгм, 1б – при статическом моменте $m\Gamma=0,0253$ кгм.; нагрузка изменяется за счет статического момента: 2а – при частоте $f=35$ Гц, 2б – при частоте $f=62$ Гц

Эффективность действия вибрации на уплотняемый материал резко снижается при частоте ниже 35 Гц (кривые 1а, 2а), а ее увеличение до 45...50 Гц при прочих одинаковых условиях позволяет повысить плотность на 5...10 %.

На рис. 2 представлена зависимость динамического модуля упругости, отнесенного к виброускорению, от величины пригруза виброблока, которая изменялась от 100 до 1100 Н. Результаты показывают, что пригруз, как статическая нагрузка, не оказывает существенного влияния на плотность упаковки, а для обеспечения надежного контакта динамического уплотнителя с обрабатываемым материалом его масса должна быть не менее 40 кг. При этом он, являясь частью колебательной системы, влияет на ее динамические параметры.

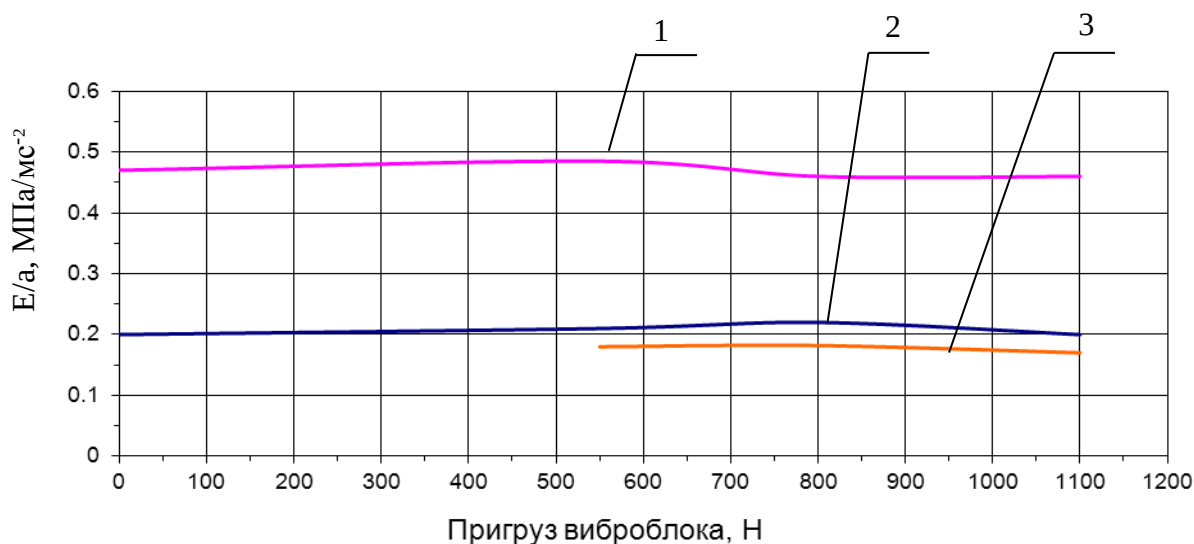


Рис. 3. Зависимость относительного модуля упругости от величины пригруза виброблока 1— частота $f=35$ Гц, статический момент $m_r=0,01265$ кгм; 2 — частота $f=44$ Гц, статический момент $m_r=0,046$ кгм; 3 — частота $f=54$ Гц, статический момент $m_r=0,052$ кгм

Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований процесса уплотнения дисперсных материалов с использованием вибрационного устройства установлено, что:

- существенное влияние на плотность оказывает ускорение колебаний рабочего органа, передаваемых сыпучей среде, причем доминирующее значение имеет частота;
- масса пригрузов не оказывает существенного влияния на увеличение плотности компакта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: Дисс. докт. техн. наук: 05.05.04 Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия — Омск — 2005—320 с.
2. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов — Л.: Машиностроение — 1973 — 176 с.
3. Патент РФ № 2553145 МПК C25C 3/08 Способ футеровки катодного устройства электролизера неформованными материалами / Прошкин А.В., Левенсон С.Я., Пингин В.В., Морозов А.В. - заявка № 2013151911/02; заявл. 25.12.2012; опубл. 10.06.2015 г., Бюл. № 16.
4. Блехман И. И. Вибрационная механика — М.: Наука — 1994.
5. Гендлина Л. И., Глотова Т. Г., Куликова Е. Г., Левенсон С. Я., Алесик М. Ю. Влияние вибрации на прочностные характеристики связных дисперсных материалов // В сб. Труды конференции "Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды" — Т. 2

© С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, А. В. Морозов, 2017

ТЕХНОЛОГИИ И КОМПЛЕКТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ЗАМЕНЫ ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ ИЗ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наталья Владимировна Ланкевич

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник научно-инженерного центра горных машин и геотехнологий ИГД СО РАН, генеральный директор ООО фирма «Комбест», тел. (383)209-25-04, e-mail: natagri@mail.ru

Предложено оборудование для замены полиэтиленовых и полипропиленовых гофрированных водоотводящих труб. Показана эффективность данной технологии при устранении аварийных ситуаций на объектах г. Новосибирска.

Ключевые слова: полипропиленовая гофрированная труба, деформация трубы, аварийные ситуации, бестраншейная замена.

TECHNOLOGIES AND SETS OF EQUIPMENT FOR NO-DIG REPLACING THE UNDERGROUND SERVICES

Natalia V. Lankevich

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Research Worker of the Scientific and Engineering Center for Mining Machines and Geotechnologies, tel. (383)209-25-04, e-mail: natagri@mail.ru

Equipment is proposed for replacing the polyethylene and polypropylene corrugated water-draining pipes. The efficiency of this technology in eliminating the emergency situations in the sites in Novosibirsk is shown.

Key words: polypropylene corrugated pipe, pipe strain, emergency situations, no-dig replacement.

Высокие темпы роста строительства и ввода в эксплуатацию нового жилья в крупных российских городах требуют обеспечения в кратчайшие сроки строительных объектов подземными коммуникациями. Для этих целей нашли широкое применение гофрированные полиэтиленовые или полипропиленовые трубы.

Согласно строительным требованиям самотечные водоотводящие трубопроводы в России прокладываются ниже глубины промерзания грунта, для средней полосы 1,40 м, для Сибири 2.20 м. по сравнению с европейскими стандартами 0,80 м. Соответственно давление грунта на трубопроводы значительно возрастает. Поэтому при прокладке трубы в российских условиях надо учитывать материал, прочность (класс) трубы, влияние на нее веса вышерасположенного грунта и применять особые технические и технологические приемы для того, чтобы трубы не теряли точные геометрические формы. К сожалению, эти требования при прокладке гофрированных полиэтиленовых или полипропиленовых труб не всегда выполняется. В процессе эксплуатации происходит деформация (рис. 1), что приводит к возникновению аварийных ситуаций на трубопроводах.

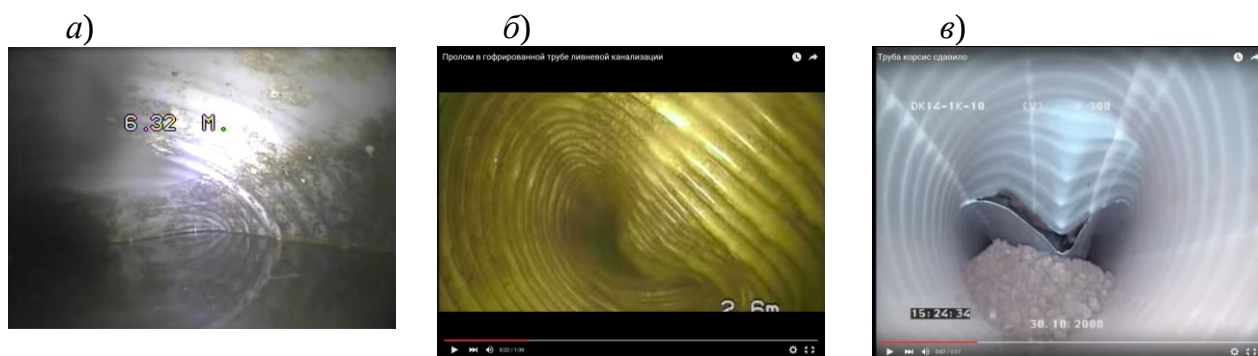


Рис. 1. Деформация гофрированного полиэтиленового трубопровода:

- а) канализационного трубопровода диаметром 315мм;
 б) в ливневой канализации; в) трубы Корсис

Для бестраншейной замены аварийных участков из гофрированной ПП и ПЭ трубы предложена и разработана конструкторами компании "Комбест" совместно с сотрудниками научно-инженерного центра ИГД СО РАН новая конструкция разрушителя с расширителем с режущими ножами на ребрах. При разработке расширителя с режущими ножами учитывалось состояние аварийного трубопровода и была назначена длина конусной части расширителя и калибрующая (цилиндрическая) часть. Его геометрия подобрана с таким расчетом, что гофрированная труба прижимается расширителем к стенкам скважины, что препятствует его перемещению в горизонтальном направлении. Так как секции гофрированной полиэтиленовой трубы имеют трубные соединения, в комплекте оборудования предусмотрена задняя подтяжка.

В основу замены гофрированных ПЭ и ПП труб легла технология бестраншейной замены водоотводящих трубопроводов из хрупких материалов. Сущность технологии заключается в следующем (рис. 2).

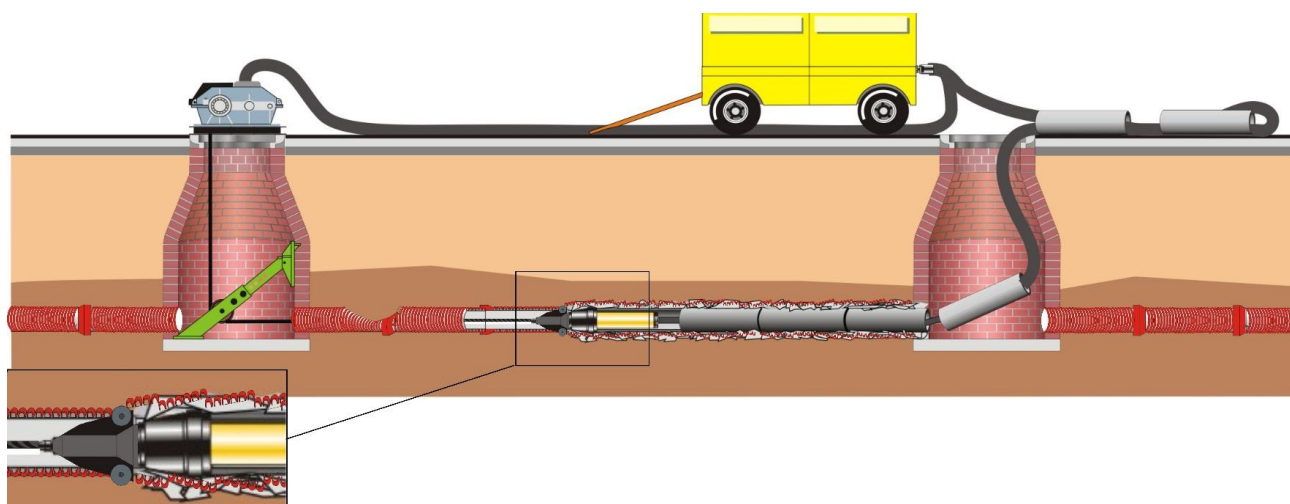


Рис. 2. Технология для бестраншейной замены подземных коммуникаций

В аварийном трубопроводе от входного колодца к выходному прокладывается тягач, одним концом присоединяемый к лебедке, установленной на выходном колодце, а другим - к рабочему органу, размещенному во входном колодце. Основу

рабочего органа составляет специальная пневматическая машина ударного действия (пневмомолот). На передней части пневмомолота размещается конусный расширитель с приспособлением для крепления к нему нового полиэтиленового трубопровода. К передней части пневмомолота присоединяется тяговый трос, а к задней – страховочно-возвратный трос. Тяговая лебедка приводится в движение от пневматического двигателя. Применение пневматического двигателя позволяет использовать один источник энергии – компрессор. С точки зрения безопасности ведения работ пневмодвигатель является явно предпочтительнее электрического. Характеристика двигателя позволяет менять тяговое усилие на тросе в зависимости от давления сжатого воздуха, подаваемого к двигателю, в диапазоне от 10 до 150 кн. Крутящий момент пневматического двигателя остается постоянным или даже возрастает при снижении скорости вращения вплоть до полной остановки. Указанная выше механическая характеристика является весьма важной, так как постоянное натяжение троса обеспечивает устойчивую работу пневмомолота и максимальную передачу ударной нагрузки расширителю. Натяжение троса лебедки компенсирует отдачу ударника пневмомолота и обеспечивает работу в установившемся режиме. Кроме того, исключается передача знакопеременной нагрузки на стенки образуемой скважины, что повышает ее устойчивость, и появляется возможность доступа к пневмомолоту в случае его отказа. Для этого необходимо отключить тормоз лебедки и при помощи страховочно-возвратного троса извлечь пневмомолот, произвести его ремонт или замену.

При подаче сжатого воздуха сначала к лебедке, а затем к пневмомолоту, рабочий орган начинает передавать ударную нагрузку на заменяемый трубопровод и разрушает его в массиве грунта. Для уменьшения степени дробления при разрушении трубопровода на его стенках нарезают опережающие продольные борозды, являющиеся концентраторами напряжения. В образуемую рабочим органом скважину затягивается присоединенный к нему пластмассовый трубопровод. Замена производится при рабочем давлении 5,5 атм, что обеспечивает энергию ударного механизма 450 Дж и скорость замены 18 м/час.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан ряд механизмов, входящих в комплекты оборудования, определены их рациональные технические характеристики и конструктивные особенности, обеспечивающие реализацию технологических схем.

Технология и комплекты оборудования прошли испытания на объекте в г. Новосибирске при устранении аварийной ситуации (рис. 3).



Рис. 3. Испытания на объекте г. Новосибирск:

а) расширитель; б) испытания на объекте

Глубина залегания полиэтиленовой трубы диаметром 315мм на объекте составляла 6 метров под межквартальной дорогой. Длина заменяемого участка трубопровода – 24.9 м. По предварительным исследованиям и данным с видеокамеры деформация трубы составляла 20 % от диаметра сверху. Работы были осложнены наличием обводненного насыпного песчаного грунта.

В ходе проведения испытаний доказана эффективность данной технологии при устранении аварийных ситуаций на объектах г. Новосибирска. Скорость замены трубопровода бестраншейным способом составила до 18 м/час.

Проведенные испытания позволили определить направления дальнейших исследований и сформулировать технические требования для разработки нескольких типовых размеров диаметром от 160 до 450мм для замены аварийных гофрированных труб.

По результатам предыдущих испытаний, был предложен еще один вариант расширителя для устранения аварийных ситуаций с деформацией гофрированной трубы до 60%. Отличительная особенность конструкции в наличии одного ребра элемента с режущими подвижными ножами. Данная особенность дает возможность постепенно приподнимать деформированную часть трубы и одновременно резать. В 2017 году планируются испытания данной конструкции на аварийных объектах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент на изобретение №2562331 РФ, МПК F16L/00 Способ и устройство для замены действующих аварийных трубопроводов /Григорашенко В.А., Харькин В.А., - Оpubл. 10.09.2015 - Бюл. №25
2. Патент на полезную модель №130598 РФ, МПК B66D1/08 Канатоведущий механизм / Тупицин С.К., Савельев А.С., Соколов П.А., Ланкевич Н.В., Григорашенко В.А. – Оpubл. 27.07.2013 – Бюл.№21

© Н. В. Ланкевич, 2017

ЭКСКАВАТОР С ПОВОРОТНЫМ КОВШОМ ДЛЯ БЕЗВЗРЫВНОЙ ВЫЕМКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Виктор Никитович Лабутин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории бурения, тел. (960)794-95-04, e-mail: LabVN@yandex.ru

Обоснована необходимость оснащения канатных экскаваторов поворотными ковшами, позволяющими увеличить длину прямолинейного участка траектории черпания по контакту порода – продуктивный пласт. Приведены результаты графоаналитического анализа работы поворотного ковша, определены основные его преимущества по сравнению с обычными ковшами при выемке продуктивных пластов на алмазородных и угольных карьерах.

Ключевые слова: экскаватор, ковш, горная порода, угольный пласт, безвзрывная технология.

ROTABLE-BUCKET EXCAVATOR FOR BLAST-FREE MINERAL MINING

Victor N. Labutin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (960)794-95-04, e-mail: LabVN@yandex.ru

Reasonability is substantiated to equip rope shovels with rotatable buckets, enabling to increase straightline length of digging track along rock-production bed contact. Data on graphical-analytical analysis of rotatable bucket operation is reported, advantages of rotatable buckets are determined against conventional ones in excavation of production beds at diamond-ore and coal open-cut mines.

Key words: excavator, bucket, rock, coal seam, blast-free mining process.

Эффективным и наиболее широко применяемым оборудованием для разработки наклонных и крутопадающих залежей являются карьерные одноковшовые экскаваторы, для которых не требуется прямолинейного фронта горных работ значительной протяженности. Эти машины обладают хорошей маневренностью, а траектория движения ковша позволяет осуществлять раздельную выемку. Наиболее приспособленными для селективной разработки угольных пластов с различными углами падения являются гидравлические экскаваторы, рабочее оборудование которых, благодаря особенностям кинематической схемы, способно с высокой точностью перемещаться по контакту порода-уголь.

За счет независимых приводов поворота ковша, рукояти и стрелы при работе гидроэкскаватора может быть получена практически любая траектория движения режущей кромки рабочего органа в забое. Это позволяет более эффективно наполнять ковш, производить послойную разработку уступа, селективную выемку полезного ископаемого в сложных горно-геологических условиях, качественно планировать подшву рабочей площадки. По сравнению с традиционными карьерными канатными экскаваторами гидравлические экскаваторы имеют повышенные усилия на зубьях ковша и в 1,5-2 раза меньшую удельную металлоемкость.

Однако, по прогнозному мнению специалистов [1], «... основными погрузочными машинами в перспективе останутся электрические лопаты, как более производительные, надежные, экономичные и долговечные. Гидравлические экскаваторы будут применяться в основном там, где требуется селективная выемка полезного ископаемого, где срок карьера сравнительно небольшой». Проведенные [2] сопоставления эффективности эксплуатации канатных и гидравлических экскаваторов показывают на преимущество того или иного в зависимости от условий их применения. Отсюда следует, что вопросы совершенствования электрических мехлопат по-прежнему заслуживают внимания.

Опыт эксплуатации карьерных экскаваторов с ковшом активного действия показал [3], что это оборудование может быть эффективно использовано при безвзрывной разработке сложно-структурных залежей угля с вмещающими породами прочностью до 60-70 МПа. Однако, возможности регулирования параметров траектории у этих экскаваторов невелики. В частности, прямолинейный участок B_1B_2 (рис. 1) траектории черпания ограничен. Поэтому послойное отделение угля от породы таким ковшом затруднено, отсюда неизбежны повышение потерь и снижение качества угля.

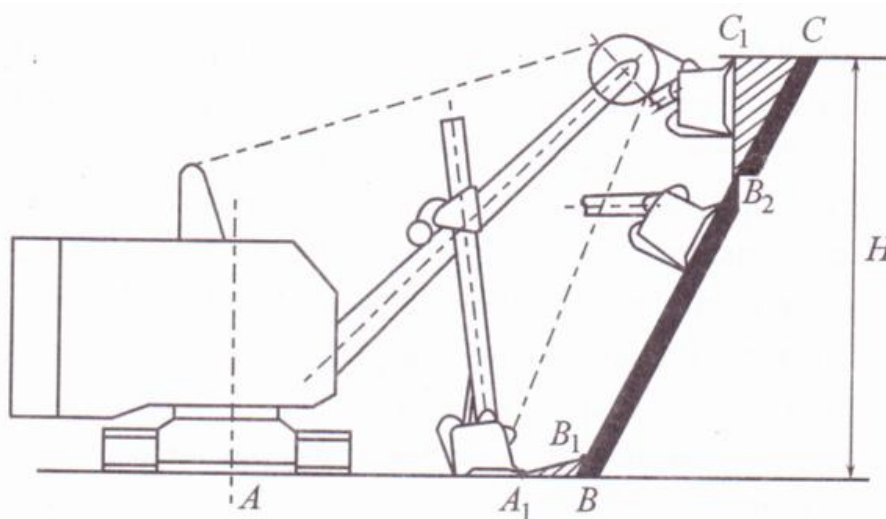


Рис. 1. Схема недобора полезного ископаемого в нижней и верхней частях забоя

Значительную часть потерь составляет недобор полезного ископаемого в нижней и верхней частях забоя, обусловленный кинематическими особенностями рабочего оборудования экскаватора с неповоротным ковшом. Величины хода ковша экскаватора по подошве уступа AB на уровне стояния экскаватора и по контакту пласта и породы BC ограничены положениями ковша в точках A_1 и B_2 , в которых его передняя стенка упирается в забой. Участки пласта A_1BB_1 и B_2CC_1 так называемые треугольники недобора (непрочерпывания) не попадают в ковш и в дальнейшем отгружаются вместе с породой в отвал. Для снижения этих потерь необходимо увеличить ход ковша по подошве уступа на уровне стояния экскаватора и по контакту продуктивного пласта и породы. Такое увеличение хода ковша при неизменных размерах рабочего оборудования экскаватора может быть достигнуто двумя способами – перемещением оси поворота рукояти вверх и изменением угла между передней стенкой ковша и рукоятью. Второму способу соответствуют экскаваторы с поворотным ковшом.

Актуальность решения проблемы поворота ковша экскаватора была обоснована еще в 60-70-е годы прошлого века, когда были опубликованы ряд отечественных и зарубежных патентов, посвященных разнообразным конструкциям механизма поворота ковша экскаватора [4-6]. Оснащение канатных экскаваторов поворотными ковшами активного действия позволит производить селективную выемку полезного ископаемого в сложных горно-геологических условиях, снизить его потери и повысить качество.

Для анализа работы поворотного ковша в качестве примера был рассмотрен ковш экскаватора ЭКГ-5В, поворот которого можно осуществлять двумя гидродомкратами (см. рис. 2) усилием по 150-200 кН и ходом 700-800 мм, а для подвода энергоносителя к гидродомкратам можно воспользоваться оригинальной конструкцией телескопического трубопровода защищенной патентом № 2149952 [7]. Предлагаемый механизм поворота ковша экскаватора ЭКГ-5В позволяет поворачивать ковш относительно рукояти на 50° .

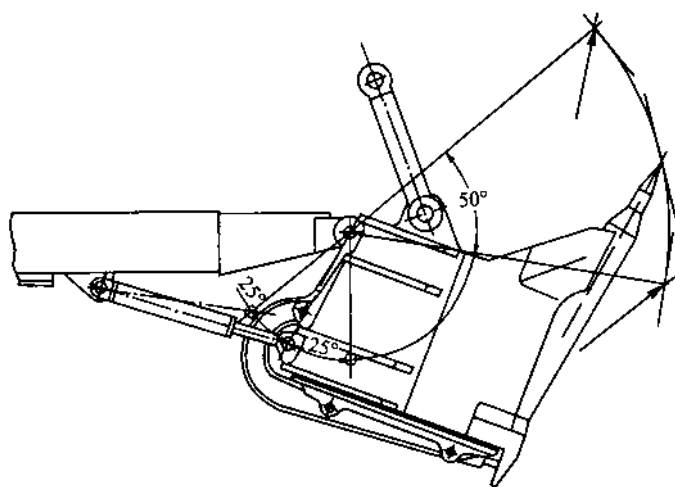


Рис. 2. Поворотный ковш экскаватора ЭКГ-5В

Известно, что на эффективность процесса резания большое влияние оказывают геометрические параметры режущего инструмента [8]: угол атаки, задний угол, угол резания и угол заострения зуба. Многочисленные исследования разрушения горных пород и резания грунтов зубьями ковша экскаватора показали, что оптимальные значения угла резания, при которых достигается наибольший эффект разрушения находятся в пределах $35-45^\circ$. Увеличение угла резания влечет за собой повышение лобового сопротивления перемещению ковша и, как следствие, возрастание силы резания, затрат энергии на разрушение горной породы. С другой стороны, чрезмерное уменьшение угла резания может сопровождаться значительным ростом сил трения, возникающих при взаимодействии задних граней зубьев с забоем. На практике допустимыми углами резания, при которых производится разработка горного массива экскаваторами, является углы в диапазоне $30-60^\circ$.

С целью определения эффективности использования поворотного ковша карьерного экскаватора при работе его по прямолинейной траектории с уступа при отделении породы от продуктивного пласта было проведено графоаналитическое исследование процесса черпания экскаваторами ЭКГ-5В и ЭКГ-12В оснащенными поворот-

ными ковшами. Сравнение поворотного ковша с обычным проводилось по следующим критериям:

- пределы изменения угла резания в процессе черпания;
- максимально возможная величина прямолинейного участка траектории черпания и получаемая при этом высота уступа;
- величина треугольников непрочерпывания.

Основные результаты исследований приведены в таблице, на основании данных которой можно сделать вывод, что поворотный ковш экскаваторов позволяет увеличить длину прямолинейного участка траектории в сравнении с обычным ковшом более, чем в 3 раза, а максимальную высоту черпания в зависимости от угла падения пласта на 50-70%.

Таблица

Сравнение параметров черпания карьерных экскаваторов с обычными поворотным ковшами

Параметры	ЭКГ-5В		ЭКГ-12В		$\frac{L^V}{L^C}$
*Длина прямолинейного участка траектории черпания L , м	$\frac{L^C}{2.93}$ 5.09	$\frac{LL^V}{9.30}$ 16.15	$\frac{L^C}{4.15}$ 7.20	$\frac{LL^V}{13.17}$ 22.86	3,17
Максимальная высота уступа с сохранением прямолинейности траектории черпания H_{max} , м при угле откоса уступа γ , град :	H_{max}^C	H_{max}^V	H_{max}^C	H_{max}^V	$\frac{H_{max}^V}{H_{max}^C}$
30°	2.50	4.24	3.56	6.03	1.69
45°	3.78	6.24	5.38	8.86	1.65
60°	5.23	8.24	7.43	11.69	1.57
75°	6.74	10.1	9.57	14.34	1.50

* Величины L^C , H_{max}^C для обычного и L^V , H_{max}^V для поворотного ковшей.

В числителе - величины, полученные при минимальном вылете рукояти, в знаменателе – при максимальном ее вылете.

Сравнительный анализ площади треугольников непрочерпывания, образующихся в процессе зачистки пластов угля с различными углами падения экскаваторами ЭКГ-5В и ЭКГ-12В иллюстрирует рис. 3. Расчеты показывают, что использование экскаваторов с поворотным ковшом для крутых пластов мощностью более 2 м при толщине теряемого на контакте продуктивного пласта с породой слоя 0,1 м обеспечивает выемку его с потерями, не превышающими 10%.

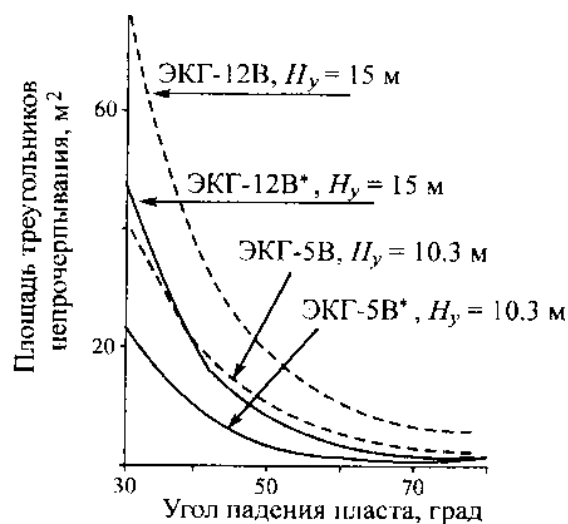


Рис. 3. Объем примешиваемой породы при обработке пласта
(* – поворотный ковш)

На рис. 4 показана зависимость максимальной высоты уступа, при которой потери угля не превышают 10%. Добиться максимального снижения потерь угля можно за счет снижения высоты уступа.

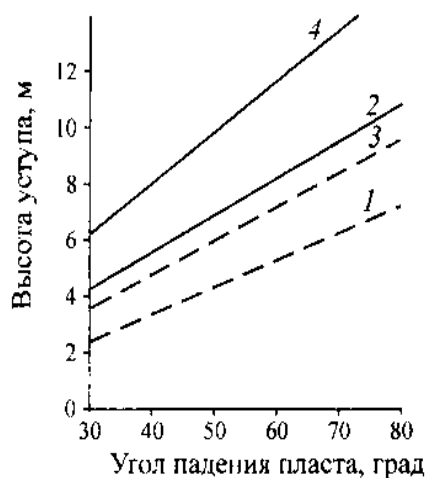


Рис. 4. Высота уступов, при которой потери угля не превышают 10%:

1 – ЭКГ-5В; 2 – ЭКГ-5В*; 3 – ЭКГ-12В; 4 – ЭКГ-12В*

Из графиков видно, что использование поворотного ковша, по сравнению с обычным, снижает потери полезного ископаемого при экскавации, при этом наибольший эффект достигается на пластах с углами падения 45-80°. Об этом свидетельствует график представленный на рис. 5, на котором показано уменьшение объема примешиваемой породы при зачистке пласта в зависимости от угла его падения.

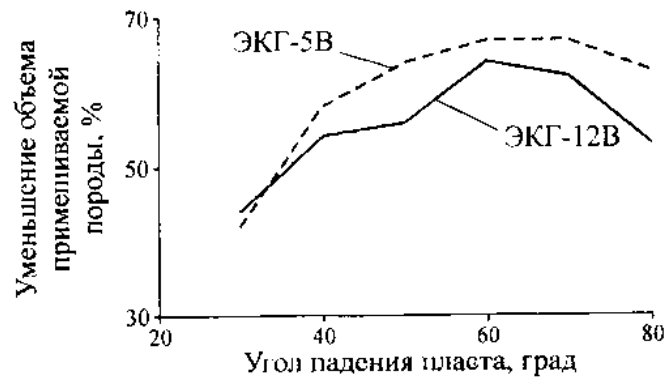


Рис. 5. Эффективность использования поворотного ковша по сравнению с обычным при высоте уступа: для ЭКГ-5В – $H=10,3\text{м}$; для ЭКГ-12В – $H=15\text{м}$

Таким образом, по результатам графоаналитического исследования работы экскаваторов ЭКГ-5В и ЭКГ-12В с поворотным ковшом можно сделать следующие выводы:

1. Прямолинейный участок забоя, обрабатываемый поворотным ковшом в оптимальном режиме (с углом резания $35-45^0$) в сравнении с обычным ковшом увеличивается в зависимости от угла падения продуктивного пласта для экскаватора ЭКГ-5В в 2,8-4,5 раза, для ЭКГ-12В в 2,7-3,3 раза.
2. Длина прямолинейного участка траектории черпания по контакту порода-продуктивный пласт для поворотного ковша в 3 раза выше в сравнении с обычным ковшом и составляет в зависимости от угла падения пласта для ЭКГ-5В – 9-15м, для ЭКГ-12В – 13-20м. Такой величины достаточно для наполнения ковша экскаватора за один цикл черпания при толщине снимаемой стружки 20-25см.
3. Безвзрывная разработка угольных и алмазородных карьеров возможна экскаваторами с ковшами активного действия при черпании по прямолинейной траектории с уступов высотой: для ЭКГ-5В до 10м, ЭКГ-12В до 15м. Наибольший эффект от применения поворотного ковша ожидается при отработке пластов с углом падения $45-80^0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горное оборудование Уралмашзавода // Коллектив авторов. – Екатеринбург: Уральский рабочий. – 2003.
2. Сытенков В.Н. Сопоставительный выбор экскаваторов типа «механическая лопата» с канатным и гидравлическим перемещением рабочего органа // Горное дело. – 2014. - №1 (2). – С.14-22.
3. Маттис А.Р., Ческидов В.И., Лабутин В.Н., Зайцев Г.Д. Перспективы применения безвзрывных технологий в карьерах // Горный журнал. – 2006. - №6. - С. 87-91.
4. А.с. №258137 СССР. МПК6 E02F3/43. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора /А.М. Гранитов и др.; Волгоградский проектный отдел института «Гидропроект» им. С.Я. Жука. – заявл. 02.12.1968. - №1288142/29-14. – опубл. 20.11.1969. БИ. №36.- 2с.
5. А.с. № 607894 СССР. МПК5 E02F3/40. Рабочее оборудование экскаватора./ А.В. Канахович и др. Предприятие п/я Г-4781. – заявл. 02.12.1968. - №1288142. - опубл. 25.05.1978. - БИ. – № 19. - 3с.

6. А.с. № 496352 СССР. МПК5 E02F3/40. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора / Б.И. Солохин и др.; Предприятие п/я Г-4781. – заявл. 03.05.1972. - №1780209/29-14. – опубл. 25.12.75. – БИ. - № 47.- 3с.

7. Пат. 2149952 РФ. МПК7 E02F3/8, E02F3/30. Экскаватор с ковшом активного действия / А.Р. Маттис и др. ИГД СО РАН. – заявл. 24.03.1999. - №99106597/03. – опубл. 27.05.2000. – БИ. - №15. – 5с.

8. Строительные и дорожные машины и оборудование // Баловнев В.И., Ермилов А.Б., Новиков А.Н. и др.; под общ. ред. Баловнева В.И. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

© В. Н. Лабутин, 2017

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАДАННОЙ ПЛОСКОСТИ ПО УДЕЛЬНЫМ СЖИМАЮЩИМ УСИЛИЯМ, ИЗМЕРЕННЫМ ПО ТРЕМ НАПРАВЛЕНИЯМ

Николай Георгиевич Кю

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, e-mail: Ku.nik1945@mail.ru

Предложен способ оценки распределения напряжений в перпендикулярной скважине плоскости по их значениям, измеренным по трём направлениям, и устройство для его реализации. Способ включает подачу устройства в скважину, предварительно заполненную твердеющим веществом, которое расширяется после отвердения.

Ключевые слова: напряжение, удельная сила, эллипс, распределение напряжений, расширяющееся вещество.

EVALUATION OF STRESS DISTRIBUTION AT A PRESCRIBED PLANE UNDER SPECIFIC COMPRESSING STRAINS MEASURED AT THREE DIRECTIONS

Nikolai G. Kyu

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., e-mail: Ku.nik1945@mail.ru

The author proposes the process to evaluate stress distribution at the plane of a perpendicular borehole by their values measured at three directions and the device for its realization. The process implies delivery of the device into a borehole, preliminarily filled with a solidifying substance, prone to expand after solidification.

Key words: stress, specific force, ellipse, stress distribution, expanding substance.

Устойчивость горной выработки при прочих равных условиях существенно зависит от сжимающих её усилий, обуславливающих отжим горной породы в свободное пространство с возможностью её разрушения. Поэтому сведения о напряжениях в плоскостях, перпендикулярных траектории проходки выработки, являются важными для оптимизации размеров и формы выработки, а также выбора способа и средств её крепления.

В традиционных подходах определения напряжений по деформации горной породы в массиве трудно учитывать влияние структуры породного массива на его состояние. Напряжение оценивают с использованием механических свойств горной породы, определённых на образцах в лабораториях [1]. Однако горная порода при извлечении её из породного массива разгружается, что при высоких начальных напряжениях приводит к необратимым изменениям её механических свойств, вплоть до разрушения.

Оценку распределения напряжений в заданной плоскости можно осуществлять по характеру взаимодействия породного массива и внедрённого в него (например, через скважину) твердеющего вещества, которое расширяется после отвердения. Такие вещества известны. К ним относятся невзрывные разрушающие средства, напри-

мер, НРС – 1. Внутри такого вещества при его расширении в скважине формируется поле напряжений, подобное полю напряжений в породном массиве. Обусловлено это следующим. Для расширения скважины необходимо к её стенкам прикладывать усилия, преодолевающие сопротивление горной породы и естественные напряжения в породном массиве. При сложном напряжённо-деформированном состоянии породного массива значение напряжений зависят от направлений. Поэтому различные участки скважины отжимаются в сторону породного массива с разным усилием, что согласно третьему закону Ньютона обуславливает различие напряжений по направлениям в веществе, которое расширяется, будучи в твёрдом состоянии. Отметим, что для исключения разрыва стенок скважины в указанное вещество добавляют снижающее его усилие материалы. Разновидность материалов и их количество подбирают экспериментально. В скважине до подачи в неё указанного вещества устанавливают однокомпонентные датчики удельной силы, фиксирующие напряжения в отвердевшем веществе по заданным направлениям.

Графически поле напряжений в плоскости можно представить в виде эллипса, радиусы которого соответствуют значениям и направлениям действующих напряжений [2].

В прямоугольной системе координат x и y (рис. 1) согласно принятым (на рис. 1) обозначениям каноническое уравнение (далее – уравнение) эллипса имеет вид:

$$\frac{x^2}{\sigma_{\max}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{\min}^2} = 1, \quad (1)$$

где $2\sigma_{\max}$ и $2\sigma_{\min}$ – длины его осей.

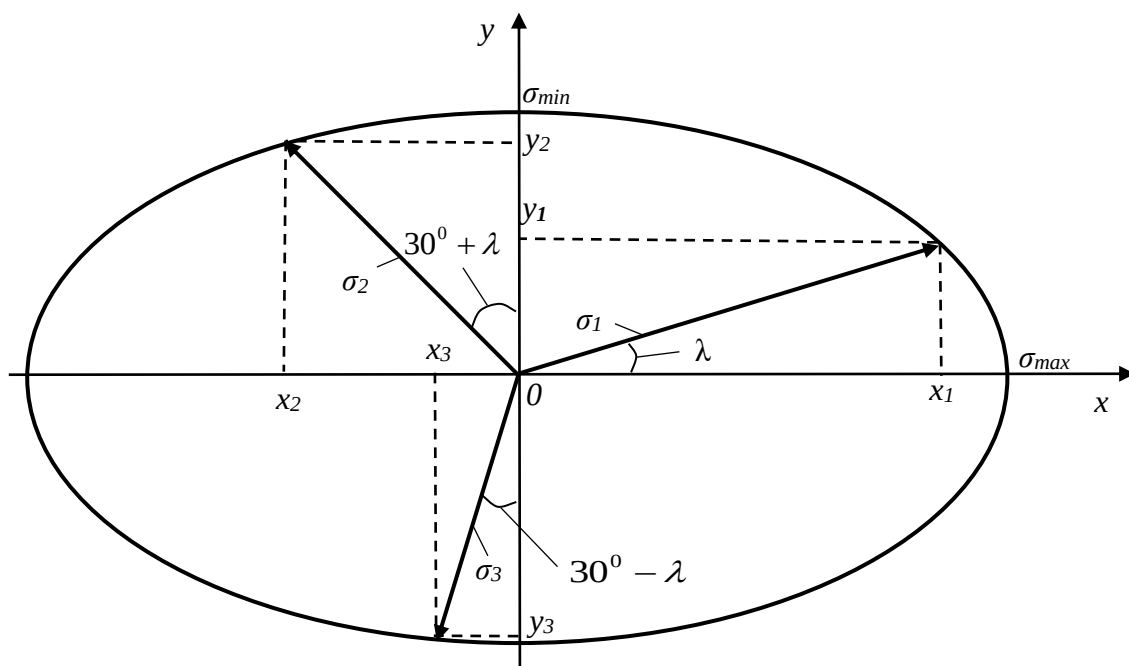


Рис. 1. К построению эллипса по трём радиусам, ориентированным под углом 120° друг относительно друга

Подставляя в уравнение (1) определенные из измерения напряжения σ_1, σ_2 и σ_3 , при условии равных углов между радиусами в 120° имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_1^2 \cos^2 \lambda}{\sigma_{\max}^2} + \frac{\sigma_1^2 \sin^2 \lambda}{\sigma_{\min}^2} = 1 \\ \frac{\sigma_2^2 \sin^2(30^\circ + \lambda)}{\sigma_{\max}^2} + \frac{\sigma_2^2 \cos^2(30^\circ + \lambda)}{\sigma_{\min}^2} = 1, \\ \frac{\sigma_3^2 \sin^2(30^\circ - \lambda)}{\sigma_{\max}^2} + \frac{\sigma_3^2 \cos^2(30^\circ - \lambda)}{\sigma_{\min}^2} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Решая первые два уравнения системы уравнений (2) относительно $\sigma_{\max}$, и $\sigma_{\min}$, имеем:

$$\sigma_{\max}^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2 [\sin^2 \lambda \sin^2(30^\circ + \lambda) - \cos^2 \lambda \cos^2(30^\circ + \lambda)]}{\sigma_1^2 \sin^2 \lambda - \sigma_2^2 \cos^2(30^\circ + \lambda)}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\min}^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2 [\sin^2 \lambda \sin^2(30^\circ + \lambda) - \cos^2 \lambda \cos^2(30^\circ + \lambda)]}{\sigma_2^2 \sin^2(30^\circ + \lambda) - \sigma_1^2 \cos^2 \lambda}. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в третье уравнение системы уравнений (2) и решая относительно угла λ , имеем:

$$\lambda = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sqrt{3} \sigma_1^2 (\sigma_2^2 - \sigma_3^2)}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2 - 2 \sigma_2^2 \sigma_3^2}. \quad (5)$$

По полученным из формул (3), (4) и (5) значениям строят эллипс и по параметрам эллипса определяют распределение напряжений в требуемой плоскости.

Техническая реализация получения исходных данных для построения эллипса, характеризующего распределение напряжений в заданной плоскости, состоит в размещении системы для определения удельной силы сжатия по трём направлениям, ориентированным под углом 120° друг относительно друга, внутри вещества, которое отвердевает и расширяется в твёрдом состоянии. Измерительная часть одной из возможных разновидностей такой системы [3] представлена на рис. 2.

На рис. 2 для его упрощения и наглядности рассмотрен наиболее простой вариант определения напряжений в заданных плоскостях с нисходящей скважиной. Такое исполнение предполагается использовать для оценки напряженного состояния горных пород через скважину, пробуренную с дневной поверхности. Например, при изыскании места заложения и проектировании систем крепления стволов шахт и рудников, контроле состояния бортов глубоких карьеров и т.д. Вместе с этим ориентация скважины может быть любой. Для заполнения горизонтальных и восходящих скважин указанным веществом предполагается использовать известные технические решения.

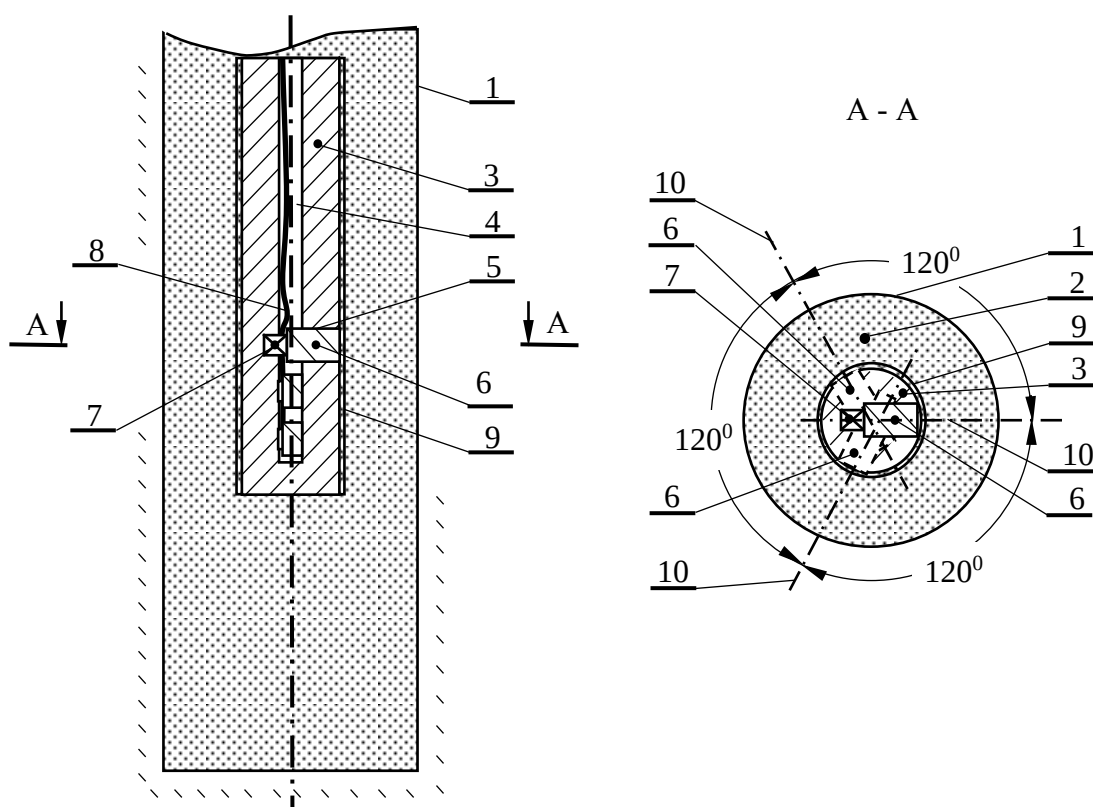


Рис. 2. Измерительная часть системы для определения удельной силы сжатия по трём направлениям, ориентированным под углом 120^0 друг относительно друга:

- 1 – скважина; 2 – твердеющее вещество, которое расширяется в твёрдом состоянии;
 3 – штанга; 4 – продольное отверстие для вывода кабеля; 5 – радиальное отверстие;
 6 – стержень с возможностью свободного перемещения в радиальном отверстии 5;
 7 – датчик силы; 8 – кабель; 9 – эластичная трубка; 10 – ось датчика силы;
 А-А – разрез поперёк скважины

Распределение напряжений в заданной плоскости предполагается определять как в естественных, так в искусственно возводимых массивах, например, плотинах. Установку измерительной системы в искусственные массивы осуществляют при их возведении без проходки скважины и использования вещества, расширяющегося при отвердении. При этом определяют истинные значения распределения напряжений по направлениям. Для естественных массивов оценивают относительные значения напряжений по направлениям. Чтобы перейти от относительных напряжений к их истинным значениям используют известные принципы теории подобия. Например, определяют напряжение по какому-нибудь одному направлению известным способом и, сравнивая его с соответствующим радиусом построенного эллипса, получают коэффициент подобия для перехода от относительных к истинным значениям напряжений по всем направлениям. Отметим, что представленная измерительная часть системы снабжена не показанным на рис. 3 механизмом её центрирования в скважине. В штанге 3 (см. рис. 3) выполнены три радиальных отверстия 5 перпендикулярно плоскостям, проходящим через ось скважины и ориентированным под углом 120^0 друг относительно друга.

Выводы

1. Распределение напряжений в заданной плоскости можно оценивать по значениям напряжений, ориентированных в трёх разных направлениях. Для напряжений, ориентированных под углом 120^0 друг относительно друга получено точное решение.

2. В веществе, которое расширяется в твёрдом состоянии, при взаимодействии с породным массивом формируется поле напряжений, содержащее информацию о напряжённом состоянии породного массива.

3. Для определения сжимающего усилия в нужном направлении достаточно в теле, размещаемом в среде, где оценивают распределение напряжений в заданной плоскости, выполнить отверстие, в котором установить стержень, а между стержнем и дном отверстия установить датчик силы, не контактирующий со стенками отверстия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закономерности изменения деформационно-прочностных и акустических характеристик геоматериалов и горных пород в зависимости от структуры при одноосном сжатии / Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н., Сиволап Б. Б. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 4. – С. 44–49.

2. Пат. 2441157 Российская Федерация, МКИ E21C 39/00. Способ оценки напряженного состояния горных пород и устройство для его осуществления / КюН.Г.; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН - № 2010113621/03; заявл. 07.04.2010 опубли. 27.01.2012.

3. Пат. 2591708 Российская Федерация, МКИ E21C 39/00, E21B47/00. Способ оценки напряженного состояния горных пород и устройство для его осуществления / КюН.Г.; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН - № 2015126159/03; заявл. 30.06.2015 опубли. 20.07.2016.

© Н. Г. Кю, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДА ПО ПРОТЯЖЕННОМУ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМУ ТОННЕЛЮ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Ольга Александровна Куликова

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, студент, тел. (913)936-25-86, e-mail: olatennis@211.ru

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Разработана расчетная модель процесса теплообмена между товарным составом, движущимся по тоннелю, и окружающим воздухом. Проведены расчеты с использованием метода конечных элементов. Показано изменение интенсивности теплообмена на различных участках состава. Проведена оценка величины снижения температуры внутреннего воздуха тоннеля при расчетной температуре атмосферного воздуха -40°C .

Ключевые слова: железнодорожный тоннель, железнодорожный состав, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.

INVESTIGATION INTO HEAT EXCHANGE INTENSITY IN FREIGHT TRAIN MOTION AT A LONG-EXTENDED RAILWAY TUNNEL IN COLD SEASON PERIOD

Olga A. Kulikova

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks prospect, Student, tel. (913)936-25-86, e-mail: olatennis@211.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Assistant Professor, Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Computational model of heat exchange between a freight train moving in a tunnel and environment air is developed. The finite element method is used in computing. Variability in heat exchange intensity at different sections of the train is demonstrated. Reduction value of the internal tunnel air temperature is calculated at assumed atmospheric air temperature -40°C .

Key words: railway tunnel, freight train, heat exchange, heat transfer coefficient.

За последнее двадцать лет на территории России введены в эксплуатацию и реконструировано 27 железнодорожных тоннелей и более 20 тоннелей проектируются [1]. Большая часть этих транспортных сооружений предназначена для эксплуатации суровых климатических условиях Сибири Дальнего Востока. На сегодняшний день Северомуйский тоннель БАМа является самым длинным железнодорожным действующим тоннелем в России, его длина составляет более 15 км, и одним из самых сложных в части эксплуатации и обслуживания. Тоннель проходит через несколько горных разломов, при этом водопритоки из водонасыщенных окружающих горных пород

достигают 10000 м³/час с каждого портала [1]. За время эксплуатации выяснено, что в период с ноября по март в средней части тоннеля на протяжении 2000 м происходит обледенение внутренней отделки тоннеля. Для поддержания безопасных условий прохождения составов, наледи и сосульки удаляют вручную, что требует выделения дополнительного временного окна и снижает пропускную способность тоннеля. Поэтому исследование теплотерь в тоннеле на нагревание холодного поезда является актуальной и практически важной задачей.

Фактические исходные данные для расчета.

Параметры наружного воздуха - 40 °С[2], параметры внутреннего воздуха тоннеля +5 °С, это температура для предотвращения начала наледообразования.

Длина состава 1-1.5 км (в среднем 72 вагонов); тяга – электровозная; скорость движения по тоннелю 35-40 км/ч (в среднем 11.1 м/с); время прохождения тоннеля около 25 мин.

В состав входят: крытые вагоны, полувагоны, цистерны и платформы. Перевозимые грузы: уголь, нефтепродукты, техника и т.д.

Исследование теплотерь на нагрев холодного поезда выполнено путем проведения вычислительных экспериментов на конечно-элементной и конечно-объемной модели движущегося поезда в тоннеле в модуле FlowSimulation программно-вычислительного комплекса SolidWorks (лицензия НГТУ, г. Новосибирск).

Для проведения расчетов, показывающих качественную картину динамики процессов теплообмена поезда с тоннельным воздухом и уменьшения расчетно-машинного времени рассмотрим первые 10 вагонов поезда за первые 10 мин его движения по тоннелю и проведем решение задачи в плоско-симметричной постановке. В качестве материала вагона примем насыпной уголь с соответствующими теплофизическими свойствами [3] при температуре -40 °С. Толщина слоя угля для снижения расчетной нагрузки принята 0.5 м, что заведомо превышает толщину прогретого слоя за время движения поезда по тоннелю. Начальная температура стенки тоннеля из железобетона и тоннельного воздуха +5 °С. Движение поезда моделируется набеганием на него потока теплого тоннельного воздуха со скоростью 11.1 м/с и движением стенки тоннеля навстречу поезду с той же скоростью.

В результате геометрического моделирования и разбиения на расчетную конечно-элементную сетку, ее размерность составила: – 32046 ячеек в воздушной среде; – 19324 ячеек в твердом теле; – 3710 частичных ячеек.

Результаты расчета в виде поля скоростей через 600 с после начала движения по тоннелю для первых двух вагонов представлены на рис. 1.

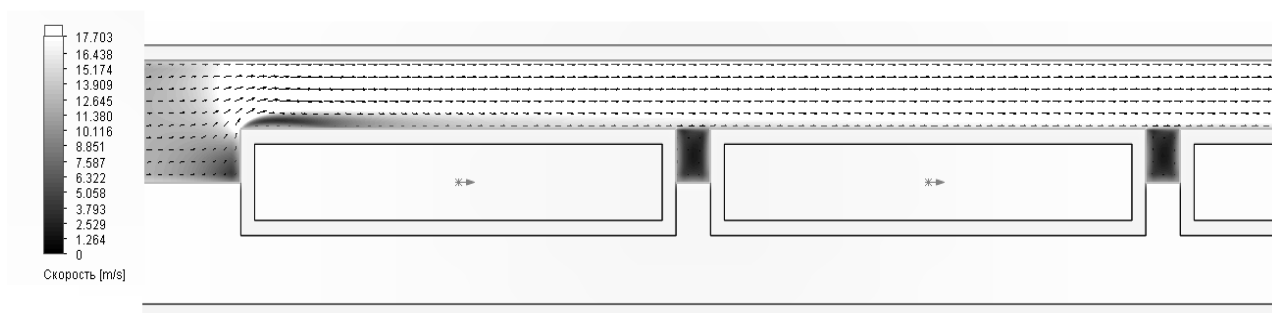


Рис. 1. Поле скоростей на 600-ой секунде, первый и второй вагоны поезда, контурная и векторная форма

На рис. 2 представлена поверхностная плотность теплового потока для вагонов 1,4,7,10. Из рисунка видно, что плотность теплового потока для средних вагонов практически совпадает, для первого вагона она выше, чем у средних, а для последнего, десятого, вагона она ниже. Это объясняется характером обтекания вагонов тоннельным воздухом, что хорошо видно по рис. 1, из которого следует, что у средних вагонов скорость на торцевой части существенно ниже, чем на боковой. Графики коэффициента теплоотдачи для этих же вагонов, приведенные на рис. 3 подтверждают этот вывод.

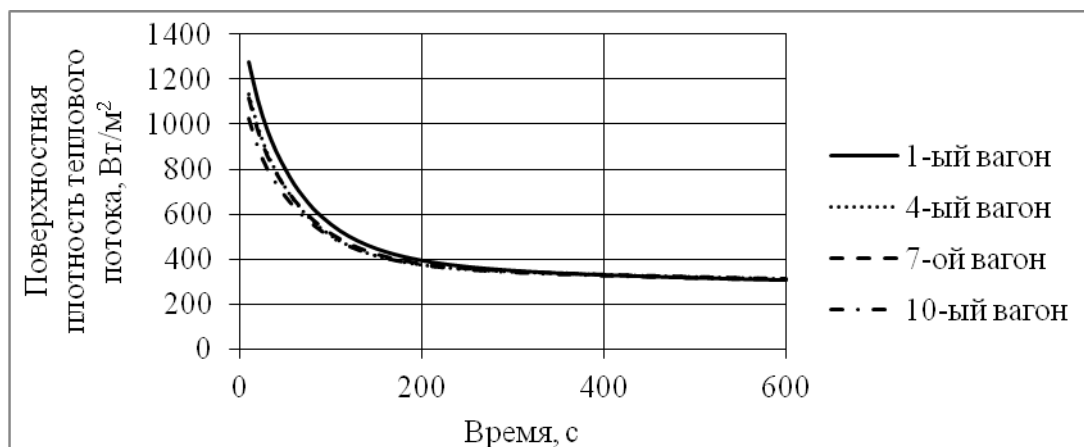


Рис. 2. Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м², на характерных вагонах поезда

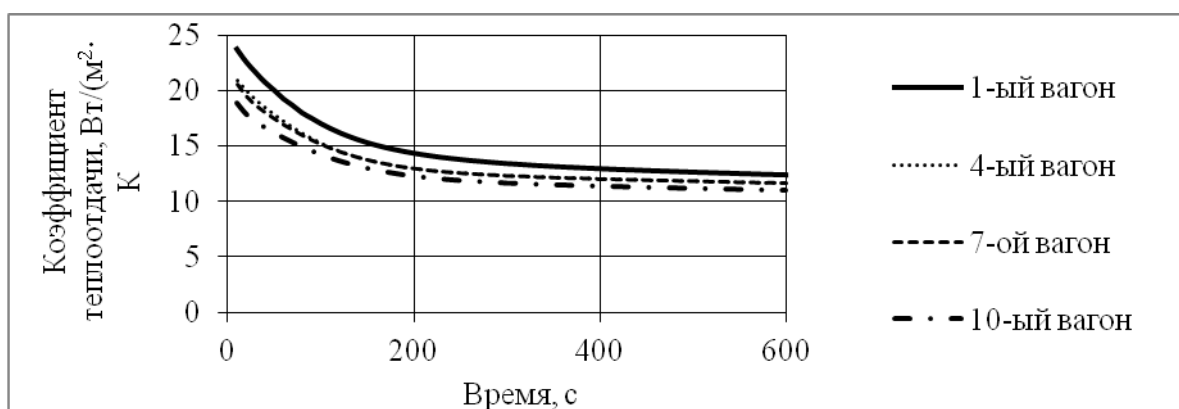


Рис. 3. Теплоотдача, Вт/(м²·К), на поверхности характерных вагонов поезда

На рис. 2, 3 видно, что резкое изменение параметров теплообмена протекает в первые 200 с от начала движения, потом скорость изменения существенно замедляется. Это связано с прогревом наружного слоя материала вагонов и снижением разницы температурных потенциалов между поездом и тоннельным воздухом.

Интерес представляет изменение температуры воздуха в поперечном сечении тоннеля за поездом, показанное на рис. 4. По рисунку видно, что в течение первых 10–20 с минимальная температура линейно падает с $+5$ до $+0.5^{\circ}\text{C}$, а средняя до $+1.5^{\circ}\text{C}$. Далее она растет и на 600 с средняя температура повышается примерно до $+3.9^{\circ}\text{C}$. Поскольку в данной задаче рассмотрены только десять вагонов, можно предположить падение средней температура на 1.1°C на каждые десять вагонов, таким об-

разом, при длине поезда более пятидесяти вагонов, за ним образуется область устойчивых отрицательных температур, что существенно повышает опасность обледенения тоннеля.

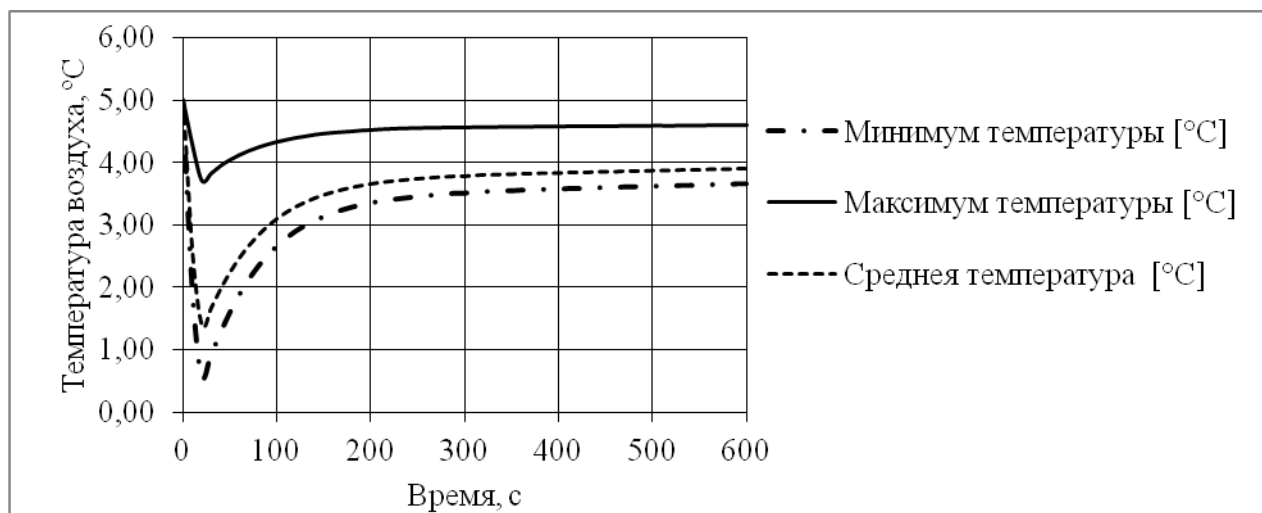


Рис. 4. Изменение температуры воздуха, °C, в поперечном сечении за поездом

Выводы

- в первые 200 с от начала движения поезда по тоннелю интенсивность теплоотдачи меняется быстро, далее замедляется;
- динамика температуры воздуха за поездом позволяет предположить снижение ее на 1,2°C на каждые 10 вагонов, что приводит к отрицательной температуре при длине поезда более 10 вагонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лугин И. В., Витченко А. А. Поддержание требуемого температурного режима в Северо-Муйском тоннеле в холодный период года средствами тоннельной вентиляции // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – № 1, Т. I. – С.210-214.
2. СП 131.13330.2012. Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012.
3. Пособие к СНиП 2.01.55-85 Теплофизические расчеты объектов народного хозяйства, размещаемых в горных выработках. – М.: Стройиздат, 1989 г.

© О. А. Куликова, И. В. Лугин, 2017

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ АСПИРАЦИИ И ГАЗООЧИСТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Олег Римович Кулагин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий конструктор, тел. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Сергей Александрович Кондратьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. отделом комбинированных способов добычи и переработки горного сырья, тел. (383)205-30-30, доп. 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Виктор Анатольевич Кузнецов

ООО «Наномодифицированные металлы и сплавы», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Инженерная, 18, кандидат технических наук, генеральный директор, тел. (913)770-58-92, e-mail: sibcvetlit@rambler.ru

Рим Асманович Кулагин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, главный специалист, тел. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Борис Борисович Сиволан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий инженер, тел. (383)335-94-44, e-mail: bor.nsk.ru@mail.ru

Разработана технология утилизации пыли аспирации и газоочистки металлургических предприятий. Разработан технический проект гидравлического брикетного пресса для брикетирования пыли.

Ключевые слова: пресс, пыль газоочистки, утилизация, брикетирование, экология.

PROCESS AND EQUIPMENT TO UTILIZE FINELY DISPERSED ASPIRATION AND GAS-CLEANING DUST AT SMELTERS

Oleg R. Kulagin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Design Project Leader, tel. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Sergey A. Kondratiev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head of Complex Mineral Mining and Processing Department, tel. (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Victor A. Kuznetsov

Nanomodified Metals and Alloys Ltd. Co., 630090, Russia, Novosibirsk, 18 Inzhenernaya St., Ph. D., Director the General, tel. (913)770-58-92, e-mail: sibcvetlit@rambler.ru

Rim A. Kulagin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Specialist, tel. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Boris B. Sivolap

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Leading Engineer, tel. (383)334-88-80, e-mail: bor.nsk.ru@mail.ru

The process for utilization of metallurgical aspiration and gas-cleaning dust is proposed. Engineering design of the hydraulic briquetting press is developed to make dust briquettes.

Key words: press, gas-cleaning dust, utilization, briquetting, ecology.

Пыли аспирации и газоочистки металлургических предприятия представляют наибольшую угрозу окружающей среде. Это связано с тем, что пыли состоят в основном из частиц размером меньше 1 мм. Например, отходы сталеплавильного производства в виде пыли и шлама до 80% состоят из мелкодисперсных частиц размером менее одного микрона. [1].

Рациональная утилизация отходов позволяет обеспечивать комплексную переработку минерального сырья на основе ресурсо- и энергосберегающих экологически безопасных технологий.

Цель работы – определить брикетирующую способность и механическую прочность брикетов, полученных из различных видов пылей аспирации и газоочистки металлургических предприятий.

В табл. 1 приведен фракционный состав отходов, которые были использованы в процессе исследования.

Таблица 1

Фракционный состав пылей аспирации и газоочистки

Наименование	Количественный состав в %			
	Размеры частиц в мкм			
	>1000	≤1000	≤100	≤60
Технический углерод (материал термической обработки).	-	25,0	70,0	5,0
Карбид кремния.	38,0	47,0	12,0	3,0
ПУД ферросплавного завода.	-	5,0	70,0	25,0
Пыль газоочистки ферросплавных печей.	-	82,0	12,0	6,0

Брикетирующая способность и механическая прочность брикетов зависят от качества подготовленной смеси. В связи с тем, что пыль газоочистки обладает развитой поверхностью, для получения однородной смеси целесообразно применять для смешивания турбулентные смесители [2]. Высокая скорость вращения (500-750 об/мин) ротора в активной зоне перемешивания развивает турбулентное движение. Готовая смесь отличается высокой однородностью и нерасслаиваемостью.

Предварительная активация сухих компонентов смешивания увеличивает механическую прочность брикетов [3].

Смешивание связующего и пыли в турбулентных смесителях–активаторах позволит минимизировать количество связующего.

Дополнительно в брикетируемую смесь можно вводить небольшое количество восстановителей (дробленый кокс или угольную пыль) для возможного ускорения всех процессов, а так же повышения температуры расплава.

Брикетирование выполняется на гидравлическом брикетном прессе ПБГ-400 с усилием прессования 400 кН [4].

Брикетная масса представляет собой смесь пыли и связующего, полученную на лабораторной модели турбулентного смесителя-активатора. В табл. 2 приведены значения пределов прочности на одноосное сжатие для исследованных видов пылей.

Таблица 2

Пределы прочности полученных брикетов на одноосное сжатие

Исходное сырье.	Диаметр х длина, мм.	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа.
Технический углерод (материал термической обработки).	50 х 50	1,3 ÷ 4,3
Карбид кремния.	50 х 50	1,4 ÷ 3,9
ПУД ферросплавного завода.	50 х 50	8,0 ÷ 10,0
Пыль газоочистки ферросплавных печей.	50 х 50	1,1 ÷ 4,0

Плотность брикетов составила $1,9 \div 2,3$ г/см³.

Исследования показали, что одной из основных причин получения брикетов невысокой прочности является недостаточное смешивание пыли со связующим материалом. Эффективное смешивание может быть достигнуто при обычной температуре с использованием турбулентных смесителей-активаторов.

При малых давлениях прессования плотность меняется линейно пропорционально величине давления, при давлении выше 20 МПа эти изменения замедляются. Дальнейшее увеличение давления (>50 МПа) не приводит к существенному увеличению плотности (рис. 1).

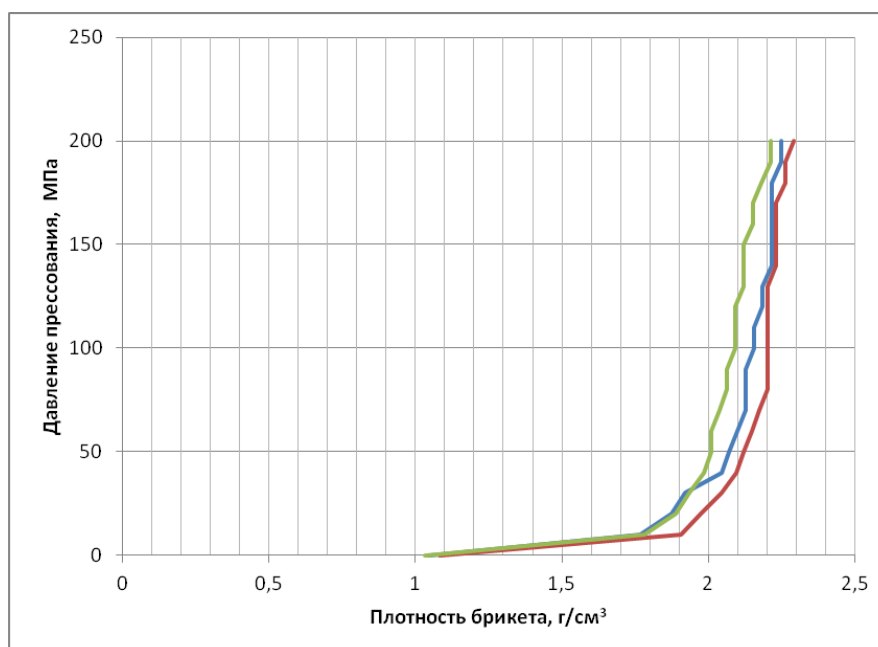


Рис. 1. Изменение плотности брикетов от давления прессования

Закономерность изменения размеров брикета по высоте (усадка) в процессе брикетирования является существенным фактором при проектировании привода брикетного пресса. При малых давлениях прессования высота брикета меняется линейно пропорционально величине давления. При давлениях выше 20 МПа уменьшение высоты брикетов существенно замедляется (рис. 2).

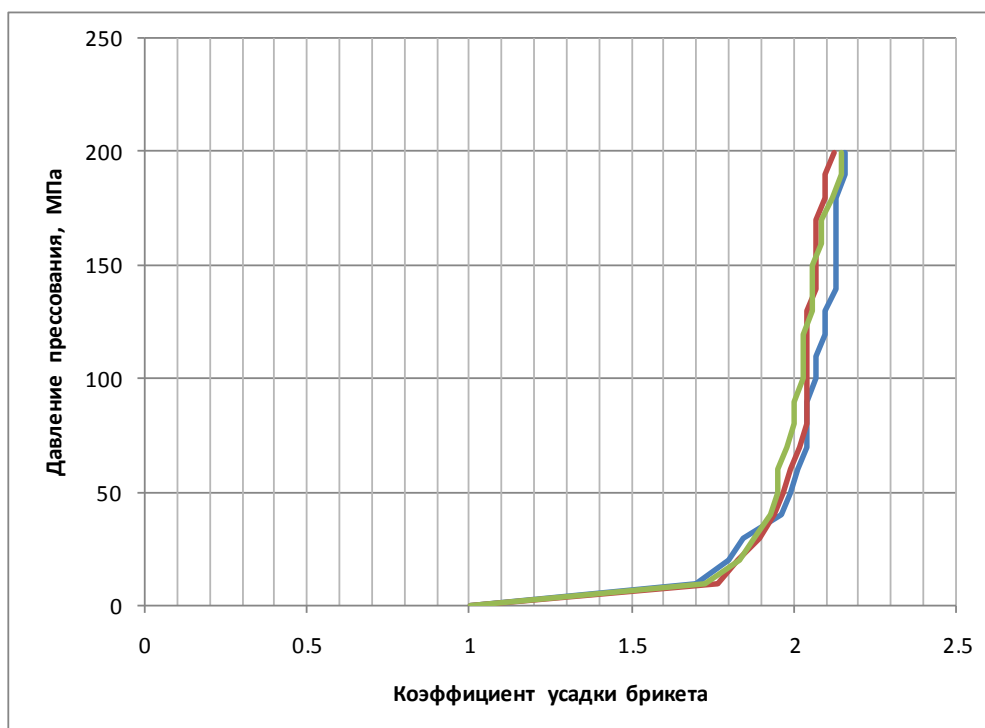


Рис. 2. Изменение коэффициента усадки брикетов от давления прессования

На основании проведенных исследований разработан технический проект гидравлического брикетного пресса для брикетирования пыли аспирации и газоочистки металлургических предприятий. Техническая характеристика пресса приведена в табл. 3.

Таблица 3

Техническая характеристика пресса

Показатели	Значение
Размеры брикетов, длина x диаметр, мм	50x50
Производительность расчетная*, кг/час	500
Усилие прессования максимальное, кН	2400
Максимальное давление гидросистемы, МПа	30
Мощность привода, кВт	37

* Производительность модуля определена по плотности брикетной массы $2,25 \text{ г/см}^3$.

Практическая ценность. Брикетирование пыли аспирации и газоочистки металлургических предприятия улучшает экологическую обстановку в районах расположения металлургических производств и позволяет получать дополнительное количество продуктов за счет переработки отходов производства.

Выводы

Анализ результатов исследований брикетирования пыли аспирации и газоочистки металлургических предприятий на прессе ПБГ-400 показывает удовлетворительное качество брикетов.

На качество брикетов в значительной степени влияет подготовка брикетной смеси. Применение турбулентного смесителя-активатора для смешивания компонентов брикетной смеси повышает прочность брикетов.

Средняя прочность брикетов на одноосное сжатие ($2,0 \div 3,5$ МПа.) позволяет осуществлять транспортировку потребителю на дальнее расстояние.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Летимин В.Н., Макарова И.В., Васильева М.С., Насыров Т.М. Пыль и шлам газоочисток металлургических заводов и анализ путей их утилизации // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – № 1.
2. Бородулин Д.М., Менх В.Г., Шушпанников А.Б., Потапов А.Н. Основные конструкции пищевых аппаратов: учебное пособие. – Кемерово: КТИПП, 2009. – С. 167.
3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – Санкт-Петербург: ООО «Строй-Бетон», 2006 г. - С. 169-171.
4. Кулагин Р. А., Кулагин О. Р., Сиволап Б. Б. Пресс для брикетирования мелкодисперсных и мелкозернистых материалов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 112–116.

*© О. Р. Кулагин, С. А. Кондратьев,
В. А. Кузнецов, Р. А. Кулагин, Б. Б. Сиволап, 2017*

ДЕФОРМИРОВАНИЕ КУСОЧНО-ОДНОРОДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОРОД С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ВСТАВКОЙ

Андрей Анатольевич Красновский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, e-mail: visanta@ngs.ru

Получена система сингулярных интегральных уравнений, связывающая значения компонент напряжений и смещений на контуре образца пород с прямоугольной вставкой из другого материала и на границе раздела свойств пород. Представлена численная реализация этих уравнений. Проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: упругость, решение, система уравнений, напряжения, смещения, образец пород.

DEFORMATION OF PIECEWISE-HOMOGENEOUS ROCK SPECIMENS WITH A RECTANGULAR INSERTION

Andrey A. Krasnovsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., e-mail: visanta@ngs.ru

The singular integral equation set relates values of stress and shear components on the contour of a rock specimen with a rectangular insertion made of other material and at interface of rock properties. The numerical realization of these equations is presented with the analysis of obtained experimental results.

Key words: elasticity, solution, equation set, stress, shear, rock specimen.

Рассмотрение неоднородных тел имеет большое значение для современной механики горных пород. Знание напряженно-деформированного состояния необходимо при расчетах на прочность, для обеспечения которых необходимо иметь все компоненты напряжений и смещений на границе, что обеспечивает контроль за возможностью начала разрушения. Расчету упругих составных конструкций посвящено много публикаций [1-3]. Во всех таких исследованиях прослеживается основной метод решения. Это метод введения правдоподобных гипотез о возможности пренебречь теми или иными компонентами перемещений и напряжений или априори задать их вид. Главное отличие слоистых конструкций от однородных заключается в более сложной структуре напряженно-деформированного состояния. Заранее нельзя предсказать какими компонентами напряжений и смещений можно пренебречь, а какими – нет, что, в конечном счете определяется геометрией и расположением слоев, их механическими постоянными. Аналитические решения для таких конструкций до настоящего времени практически отсутствовали и на первое место вышли численные методы. Целью работы является применительно к упругим кусочно-однородным средам, рассмотреть одновременно и единообразно все три основные задачи и предложить методы их реализации. Полученные решения являются удобной основой для решения задач о деформировании слоистых образцов при произвольном нагружении.

Рассмотрим деформирование кусочно-однородного образца пород, схема которого представлена на рис. 1. Граничные условия, в качестве примера, сформулируем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_n = \sigma_0 = -1, u = 0 \quad & \text{на гранях } -b \leq x \leq b, y = -h \text{ и } y = h, \\ \sigma_n = 0, \tau_n = 0 \quad & \text{на гранях } -h \leq y \leq h, x = -b \text{ и } x = b. \end{aligned} \quad (1)$$

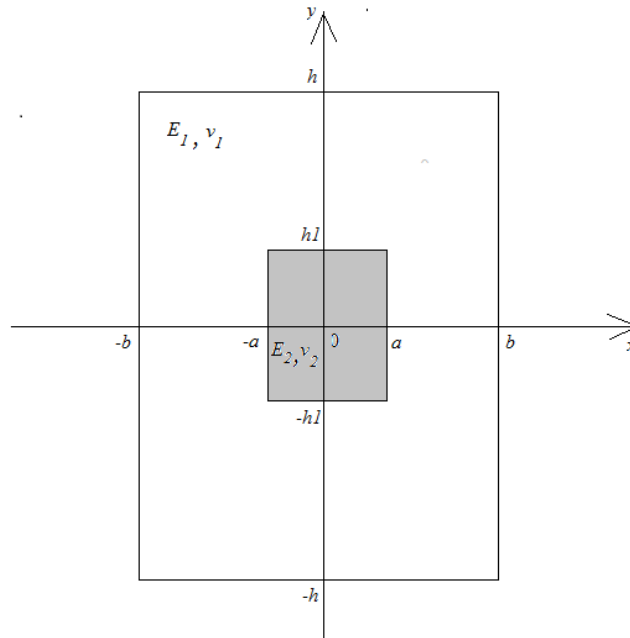


Рис. 1. Схема кусочно-однородного образца пород

Учитывая геометрическую и силовую симметрию, будем рассматривать четверть образца пород (рис. 2) с контуром $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$, ($\Gamma_1 = \Gamma_{11} + \Gamma_{12} + \Gamma_{13} + \Gamma_{14} + \Gamma_{15} + \Gamma_{16}$, $\Gamma_2 = \Gamma_{21} + \Gamma_{22} + \Gamma_{23} + \Gamma_{24}$), где Γ_{11} : $a \leq x \leq b$, $y = 0$; Γ_{12} : $0 \leq y \leq h$, $x = b$; Γ_{13} : $0 \leq x \leq b$, $y = h$; Γ_{14} : $h1 \leq y \leq h$, $x = 0$; Γ_{15} : $0 \leq x \leq a$, $y = h1$; Γ_{16} : $0 \leq y \leq h1$, $x = a$; Γ_{21} : $0 \leq x \leq a$, $y = 0$; Γ_{22} : $0 \leq y \leq h1$, $x = a$; Γ_{23} : $0 \leq x \leq a$, $y = h1$; Γ_{24} : $0 \leq y \leq h1$, $x = 0$, для которого сформулируем граничные условия в виде:

$$\begin{aligned} v = 0, \tau_n = 0 \quad & \text{на } \Gamma_{21} + \Gamma_{11}, \\ u = 0, \tau_n = 0 \quad & \text{на } \Gamma_{24} + \Gamma_{14}, \\ \sigma_n = 0, \tau_n = 0 \quad & \text{на } \Gamma_{12}, \\ \sigma_n = -1, u = 0 \quad & \text{на } \Gamma_{13}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_n , τ_n – нормальные и касательные напряжения; u , v – горизонтальная и вертикальная компоненты смещений.

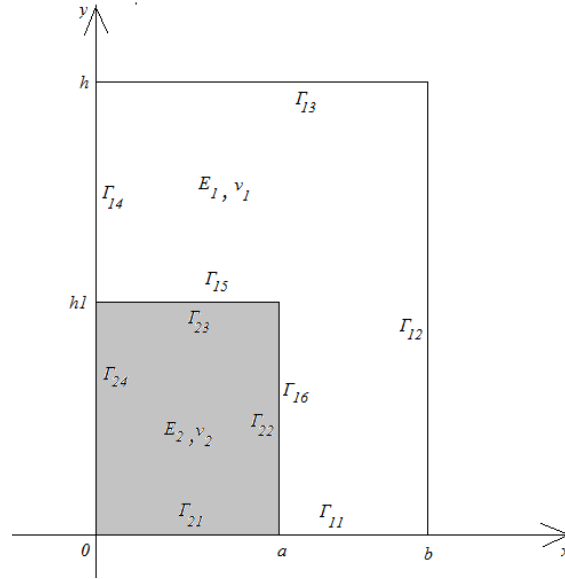


Рис. 2. Расчетная схема четверти кусочно-однородного образца пород

В данной постановке образец пород состоит из двух частей, каждая из которых представляет собой односвязную область.

Система сингулярных интегральных уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений для произвольной односвязной области имеет вид [4]

$$f(t_0) + 2\mu g(t_0) = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0} dt, \quad (3)$$

$$k \overline{f(t_0)} - 2\mu \overline{g(t_0)} = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{k \overline{f(t)} - 2\mu \overline{g(t)}}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} (f(t) + 2\mu g(t)) d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0},$$

где $k = 3 - 4\nu$, $\mu = E[2(1 + \nu)]^{-1}$, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга; $g = u + i\nu$; u , ν – касательные и нормальные компоненты смещений в точках на Γ ;

$$f(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds, \quad (4)$$

X_n , Y_n – усилия на Γ в направлении осей x и y ; $t \in \Gamma$, t_0 – аффикс точки границы; черточка над функцией обозначает сопряженное значение; i – мнимая единица.

Предполагается, что на границе раздела свойств частей кусочно-однородного образца пород имеет место сцепление

$$\sigma_n^1 = \sigma_n^2, \quad \tau_n^1 = \tau_n^2, \quad u^1 = u^2, \quad \nu^1 = \nu^2, \quad (5)$$

т. е. непрерывность нормальных и касательных компонент напряжений и смещений, где верхний индекс соответствует номеру части образца пород.

На основании (3) – (5) получена система уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений на контуре четверти кусочно-однородного образца пород и границе раздела свойств, имеющая вид, аналогичный [4]. Например, уравнение для $u_1^2(x)$ на Γ_{21} :

$$\begin{aligned} 4\mu_2 u_1^2(x) = & (\kappa_2 - 1)f_{11}^2(x) + \frac{1}{\pi} \int_0^a \frac{(\kappa_2 + 1)f_{12}^2}{s - x} ds + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_0^{h1} \frac{(a - x)[4\mu_2 u_2^2 - (\kappa_2 - 1)f_{21}^2] + (\kappa_2 + 1)s f_{22}^2}{(a - x)^2 + s^2} ds + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_a^0 \frac{(\kappa_2 + 1)(s - x)f_{32} + (h1)[(\kappa_2 - 1)f_{31}^2 - 4\mu_2 u_3^2]}{(s - x)^2 + (h1)^2} ds + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_{h1}^0 \frac{(\kappa_2 + 1)s f_{42}^2 - x[4\mu_2 u_4^2 - (\kappa_2 - 1)f_{41}^2]}{s^2 + x^2} ds - \\ & - \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{h1} \frac{2(a - x)[s^2 - (a - x)^2](f_{21}^2 + 2\mu_2 u_2^2) - 4s(a - x)^2(f_{22}^2 + 2\mu_2 u_2^2)}{[s^2 + (a - x)^2]^2} ds + \right. \\ & + \int_a^0 \frac{4(h1)^2(s - x)(f_{32}^2 + 2\mu_2 u_3^2) + 2(h1)[(s - x)^2 - (h1)^2](f_{31}^2 + 2\mu_2 u_3^2)}{[(s - x)^2 + (h1)^2]^2} ds + \\ & \left. + \int_{h1}^0 \frac{-4sx^2(f_{41}^2 + 2\mu_2 u_4^2) + 2x(x^2 - s^2)(f_{42}^2 + 2\mu_2 u_4^2)}{(s^2 + x^2)^2} ds \right\}. \end{aligned}$$

Отнеся, все линейные размеры к a , а величины, имеющие размерность напряжений, к σ_0 , получаем ее численную реализацию, результаты которой распространены по симметрии для всего образца пород (рис. 1) для наглядности. Расчеты проводились при $h = 6$, $b = 3$, $\nu = 0.25$, $E_2 = 3E_1 = 3 \cdot 10^4$ для случаев:

$$1) h1 = 2; a = 1; \quad 2) h1 = 1; a = 1; \quad 3) h1 = 1; a = 2. \quad (6)$$

На рис. 3 представлено деформирование периметра и границы раздела свойств образца пород для случаев (6) соответственно.

На рис. 4 приведены результаты расчета горизонтальной компоненты смещений $u(y)$ боковой грани образца пород ($-h \leq y \leq h$, $x = b$ (рис. 1)). Кривым 1, 2, 3 соответствуют случаи $h1/a = 2$; $h1/a = 1$; $h1/a = 0.5$ соответственно.

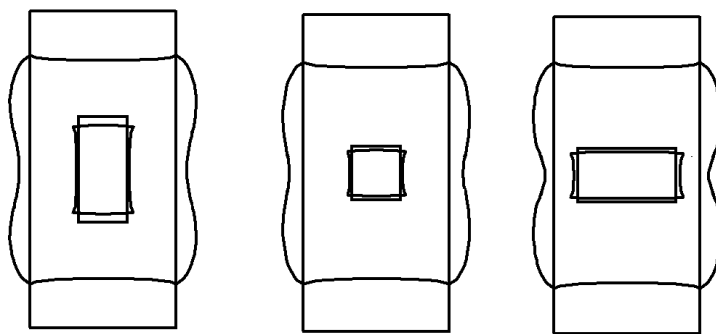


Рис. 3. Деформирование периметра кусочно-однородного образца пород
при $E_2 = 3E_1$

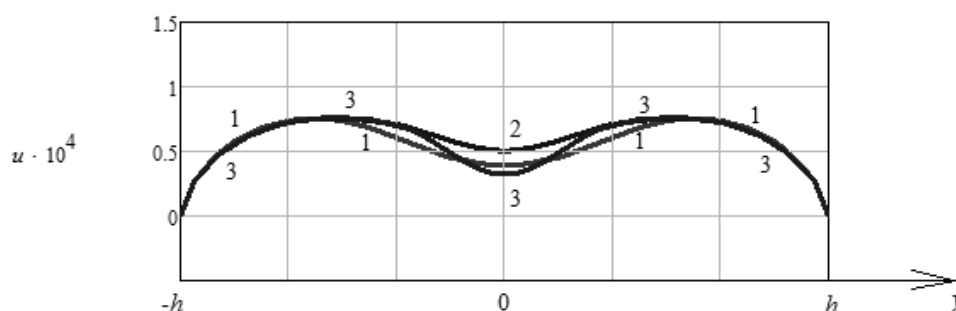


Рис. 4. Граничные значения горизонтальных смещений
боковой грани $-h \leq y \leq h$, $x = b$

Таким образом, получена система сингулярных интегральных уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений на контуре образца пород с прямоугольной вставкой из другого материала и границе раздела свойств пород, в предположении симметрии, описанной выше. Представление решения в интегральной форме позволяет осуществить как изучение самого решения, так и организацию варьирования входящими параметрами задачи для достижения желаемых свойств решения. Приведена численная реализация этих уравнений. Полученные результаты являются важной основой для дальнейших исследований, связанных с постановкой, решением и анализом результатов более сложных задач о расчете напряженно-деформированного состояния кусочно-однородных образцов пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости – М.: Наука, 1966. – 706 с.
2. Баренблатт Г.И., Христианович С.А. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР, ОТН – 1955. – №11. – С. 73-86.
3. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом. Изв. АН СССР, ОТН. – 1942– № 7. – С. 13-28.
4. Красновский А.А., Миренков В.Е. Восстановление граничных условий при сжатии пород // ФТПРПИ. – 2009. – № 4. – С. 14-22.

© А. А. Красновский, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ (RQD) И РЕЙТИНГА (RMR) РУДНОГО МАССИВА В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ ШАХТЫ «СКАЛИСТАЯ»

Юрий Николаевич Шапошник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, тел. (983)302-87-06, e-mail: shposhnikyury@mail.ru

Владимир Александрович Усков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки рудных месторождений тел. (383)205-30-30, доп. 198, e-mail: wau347743@list.ru

Исследована степень нарушенности рудного массива в разведочном штреке шахты «Скалистая». Определены качественная характеристика (RQD) и рейтинг (RMR) массива богатой руды. Рекомендованы условия поддержания выработки.

Ключевые слова: рудный массив, степень нарушенности, устойчивость, безопасность, технологические параметры.

DEFINITIONS QUALITATIVE CHARACTERISTIC (RQD) AND RATING (RMR) ORE MASS IN THE UNDERGROUND DRIVE OF THE SKALISTY MINE

Yury N. Shaposhnik

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., professor, Principal Researcher, Physical-technical Geotechnology Laboratory, tel. (983)302-87-06, e-mail: shposhnikyury@mail.ru

Vladimir A. Uskov

Inst Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Principal Researcher, Underground Ore Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 198, e-mail: wau347743@list.ru

The degree of disturbance of the ore mass in the exploration drive of Skalisty mine. Defined qualitative characteristic (RQD) and rating (RMR) of rich ore mass ore. Recommended conditions of maintaining production.

Key words: rock mass, damage, stability, safety, technological parameters.

Шахта «Скалистая» входит в состав объединенного рудника «Комсомольский» Заполярного филиала публичного акционерного общества «Горно-металлургическая компания «Норильский Никель» (ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель») и отрабатывает Первую и Вторую Северные залежи Талнахского месторождения медно-никелевых руд [1]. Сульфидные медно-никелевые руды располагаются на восточном крыле Норильско-Хараелахского разлома (НХР на рис. 1) и представлены тремя промышленными типами: сплошными (богатыми), медистыми и вкрапленными рудами (рис. 1).

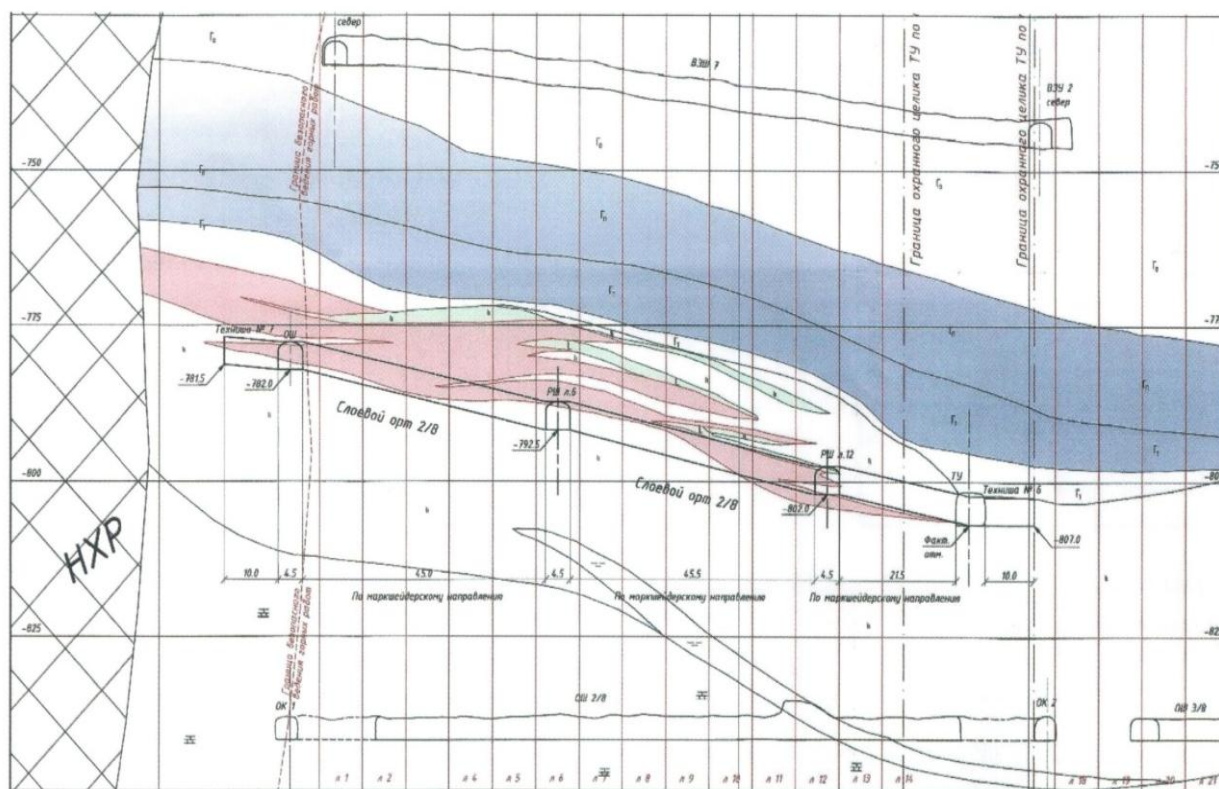


Рис. 1. Условия залегания Северной залежи 2: разрез по слоевому орту 2/8 [1]

Благоприятные условия залегания пластообразных рудных залежей под углом падения 6-8° позволяют наиболее эффективно отрабатывать их самоходной техникой с дистанционным управлением камерной системой разработки с плоским днищем с твердеющей закладкой. В кровле богатых руд залегают габбро-долериты Талнахского интрузивного комплекса. Контакты с перекрывающими породами и подстилающими песчаниками четкие, ровные или слабоволнистые.

Физико-механические характеристики руды и вмещающих пород приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства руды и вмещающих пород

Порода, руда	Показатели		
	Плотность, т/м ³	Прочность при сжатии, $\sigma_{сж}$, Мпа	Динамический модуль упругости $E \times 10^3$, Мпа
Габбро-долериты	3.0	160÷190	80
Сплошные сульфидные руды	4.0	95	80
Песчаник	2.6	148	15

На шахте «Скалистая» паспорта крепления подземных горных выработок составляют на основе критериев, учитывающих горно-геологические характе-

ристики массива пород: прочность, трещиноватость, напряженное состояние – (первичные факторы) и горнотехнических условий проходки и эксплуатации выработок: изменение конфигурации очистных пространств, взрывные работы, различные операции технологических циклов – (вторичные факторы). Существуют рекомендации [2] по выбору вида крепи нарезных и подготовительных выработок вне зоны влияния и в зоне влияния очистных работ для рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

Задачей исследований являлось изучение нарушенности рудного массива в разведочном штреке РШ л12 шахты «Скалистая» (рис. 1) для определения качественной характеристики (RQD) и рейтинга (RMR) богатой руды с последующим сравнением рекомендуемых условий поддержания выработки по зарубежным методикам с существующими рекомендациями [2].

Основной популярностью за рубежом при выборе типа крепления выработок пользуются два критерия устойчивости массивов: классификация Бенявского (RMR) и критерий Бартон (Q). Геомеханическая классификация (рейтинг горных пород - RMR) была предложена Бенявским в 1973 году [3]. В систему вносили изменения, по мере поступления новых данных, полученных в ходе исследований. Одна из последних версий RMR была принята в 1989 году [4,5].

Съемка трещиноватости рудного массива в РШ л12 проводилась линейным методом массовых замеров (Scanline Mapping). Инструментально (горным компасом и рулеткой) измерялись углы и азимуты падения трещин (Dip & Dip Direction), длина следа трещин на поверхности горных выработок (Trace Length), расстояние по нормали до ближайшей трещины данной системы (Spacing).

Методика определения качественных характеристик горных пород Rock Quality Designation (RQD) по наблюдениям в подземных выработках состоит в измерении рулеткой по прямым линиям на поверхности массива пород. Участок на борту выработки пересекался лентой рулетки и выполнялась фотосъемка трещин на фоне ее линейной шкалы.

Значение RQD вычислялось как отношение суммарной длины участков длиной более 10 см на общую длину линии замера равной 200 см. Схема измерений представлена на рис. 2. RQD можно измерять в различных направлениях.

Трещины протяженностью менее чем 1 м не должны включаться в вычисления RQD, так как трещина может быть создана в результате повреждения массива от взрыва и не оказывает значимого влияния на устойчивость массива горных пород (не достаточно длинна).

Во избежание влияния трещин, образованных в массиве при взрыве, только трещины - отдельности длиннее 1 м включаются для оценки RQD при линейном картировании.

Устойчивость массива горных пород определяется по критерию прочностных свойств пород и характеристики их монолитности по показателю состояния пород RQD, отражающим выход керна в столбцах длиной более 0,1 м, модулей трещиноватости и кусковатости (табл. 2).

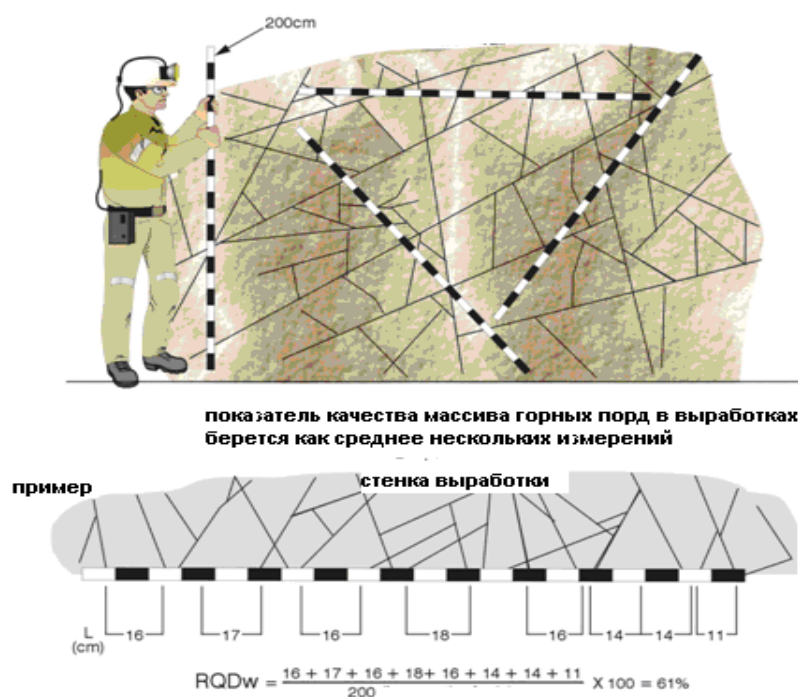


Рис. 2. Определение RQD по наблюдениям в подземных выработках.

Таблица 2

Классификация устойчивости массива горных пород по рейтингу RQD

Категория и степень устойчивости пород	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Выход керна, %	Показатель состояния пород RQD, %	Модуль трещиноватости, тр/м	Модуль кусковатости, кс/м
I - весьма устойчивые	>80	>85	>92	≤ 1	<2
II - устойчивые	50-80	30-85	60-97	1-5	2-8
III - средней устойчивости	10-50	5-30	40-60	5-15	8-15
IV - неустойчивые	<10	<5	<40	>15	>15

Для определения рейтинг массива горных пород RMR используют следующие показатели массива:

- прочность пород на одноосное сжатие (рейтинг J_{A1} в пределах от 0 до 15 баллов в зависимости от прочности пород);
- показатель качества массива RQD (Rock Quality Designation) (рейтинг J_{A2} в пределах от 3 до 20 баллов в зависимости от показателя RQD);
- расстояние между трещинами (рейтинг J_{A3} в пределах от 5 до 20 баллов); характеристика трещин (рейтинг J_{A4} в пределах от 0 до 30 баллов), включающая:
- шероховатость трещин (рейтинг J_{A41} в пределах от 0 до 6 баллов);

- длина трещин (рейтинг J_{A42} в пределах от 0 до 6 баллов);
- раскрытие трещин (рейтинг J_{A43} в пределах от 0 до 6 баллов);
- заполнение трещин (рейтинг J_{A44} в пределах от 0 до 6 баллов);
- выветрелость стенок трещин (рейтинг J_{A45} в пределах от 0 до 6 баллов).

Рейтинговая оценка геологической характеристики трещиноватости J_{A4} определялся суммой рейтингов по отдельным показателям по формуле [5]:

$$J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45} \quad (1)$$

- условия обводненности выработки (рейтинг J_{A5} в пределах от 0 до 15 баллов);

- направление трещин относительно оси выработки и угол их падения (рейтинг J_B в пределах от 0 до -12 баллов; отрицательные значения баллов рейтинга данного показателя при определении итогового рейтинга массива RMR вычитаются из суммы баллов других показателей).

Итоговый рейтинг массива определялся суммой баллов по всем показателям в пределах от 0 до 100 баллов по формуле [5]:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B \quad (2)$$

Фотография борта РШ л12 в момент проведения замеров приведена на рис. 3.



Рис. 3. Фотография с наложением трещин богатой руде на борту РШ л12 шахты «Скалистая» (пикет 374)

Указания по определению значений RMR рейтингов всех показателей в баллах приведены в табл. 3–5.

Таблица 3

Определение рейтинговых показателей массива горных пород RMR

Параметр	Интервалы значений						
А1. Прочность породы на одноосное сжатие	> 250 МПа	100÷250 МПа	50÷100 МПа	25÷50 МПа	5÷25 МПа	1÷5 МПа	< 1 МПа
Рейтинг J_{A1}	15	12	7	4	2	1	0
А2. Качество массива по выходу керна RQD	90% ÷ 100%	75% ÷ 90%	50% ÷ 75%	25% ÷ 50%	< 25%		
Рейтинг J_{A2}	20	17	13	8	3		
А3. Расстояния между трещинами	>2 м	0.6 – 2м	200 - 600 мм	60 - 200мм	<60 мм		
Рейтинг J_{A3}	20	15	10	8	5		
А4. Характеристика трещин							
А4.1. Шероховатость трещин	очень шероховатые	слегка шероховатые	слегка шероховатые	гладкие поверхности	следы скольжения		
Рейтинг J_{A41}	6	5	3	1	0		
А4.2. Длина трещин	<1 м	1÷3 м	3÷10 м	10÷20 м	>20 м		
Рейтинг J_{A42}	6	4	2	1	0		
А.4.3. Раскрытие трещин	нет	<0,1 мм	0,1÷1,0 мм	1÷5 мм	>5 мм		
Рейтинг J_{A43}	6	5	4	1	0		
А4.4. Заполнитель трещин	нет	твёрдый заполнитель < 5 мм	твёрдый заполнитель > 5 мм	мягкий заполнитель < 5 мм	мягкий заполнитель > 5 мм		
Рейтинг J_{A44}	6	4	2	2	0		
А4.5. Выветрелость стенок трещин	нет	слегка выветрелые	средне выветрелые	сильно выветрелые	раздробленные		
Рейтинг J_{A45}	6	5	3	1	0		
$J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45}$			20	10	0		
А5. Обводненность выработки	полностью сухая	влажная	мокрая	капез	водоприток		
Рейтинг J_{A5}	15	10	7	4	0		
В. Ориентация трещин	очень благоприятные	благоприятные	средние	неблагоприятные	очень неблагоприятные		
Рейтинг J_B	0	- 2	- 5	- 10	- 12		

В результате обработки результатов измерений в разведочном штреке РШ л12 шахты «Скалистая» получены следующие показатели нарушенности рудного массива.

Таблица 4

Классификация массивов по рейтингу RMR

Рейтинг массива <i>RMR</i>	Класс скального массива	Оценка устойчивости	Среднее время устойчивости	Сцепление в массиве, МПа	Угол внутреннего трения, град.
100 ÷ 81	I	весьма устойчивые породы	20 лет при пролете 15 м	> 0,4	> 45
80 ÷ 61	II	устойчивые породы	1 год при пролете 10 м	0.3÷0.4	35 ÷ 45
60 ÷ 41	III	породы средней устойчивости	1 неделя при пролете 5 м	0.2÷0.3	25 ÷ 35
40 ÷ 21	IV	неустойчивые породы	10 часов при пролете 2.5 м	0.1÷0.2	15 ÷ 25
< 21	V	весьма неустойчивые породы	30 мин. при пролете 1 м	< 0,1	< 15

Таблица 5

Влияние ориентации трещин на устойчивость выработок

Простираие трещин вкрест оси выработки		Простираие трещин параллельно оси выработки	
проходка выработки ведется по падению трещин с углами падения 45÷90°	проходка выработки ведется по падению трещин с углами падения 20÷45°	углы падения трещин 45÷90°	углы падения трещин 20÷45°
очень благоприятные	благоприятные	неблагоприятные	очень неблагоприятные
проходка выработки ведется против падения трещин с углами падения 45÷90°	проходка выработки ведется против падения трещин с углами падения 20÷45°	углы падения трещин 0÷20° независимо от простираия	
благоприятные	неблагоприятные	неблагоприятные	

Показатель качества массива RQD по формуле (2) при расстояниях между трещинами по горизонтали (более 10 см): 36.1; 14.5; 23.7; 19.1; 17.9; 12.0; 27.4 и суммарной длине участка 200 см:

$$RQD = \frac{36.1+14.5+23.7+19.1+17.9+12.0+27.4}{200} \times 100\% = 75.3\%$$

Расчетные рейтинги для определения рейтинга массива RMR следующие:

- при прочности богатых руд на одноосное сжатие 95 МПа значение рейтинга $J_{A1} = 7$;
- при качестве массива RQD = 75.3% рейтинг $J_{A2} = 17$;
- при расстоянии между трещинами (рис. 2), равное 200 см / 14 (количество

трещин) = 20 см, значение рейтинга равно 14.2, для дальнейших расчетов принимаем $J_{A3} = 8$;

Рейтинг шероховатости трещин J_{A4} определяется по формуле (1):

$$J_{A4} = 3 + 2 + 4 + 2 + 6 = 17,$$

где при слегка шероховатых трещинах принято $J_{A41} = 3$; при длине трещин 3-10 м принято $J_{A42} = 2$; при раскрытии трещин 0.1÷1.0 мм принято $J_{A43} = 4$; при мягком заполнителе < 5 мм принято $J_{A44} = 2$; при отсутствии выветрелости стенок трещин принято $J_{A45} = 6$.

При полностью сухой выработки рейтинг обводненности выработки принято значение показателя $J_{A5} = 15$.

Проходка выработки ведется против падения трещин с углами падения 45÷90°, ориентация трещин благоприятная, следовательно, рейтинг составляет $J_B = -2$. Тогда рейтинг богатых руд $RMR = 62$.

По рейтингу RMR богатые руды могут быть отнесены к устойчивым породам. Скальный массив богатых руд имеет II класс устойчивости (табл. 4).

Тогда значение показателя Q рейтинга Бартон [5,6] для богатых руд определяется по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}, \quad (3)$$

где $RQD = 75.3$ - качество породы; $J_n = 4$ - количество систем трещин; $J_r = 3$ - показатель шероховатости трещин; $J_a = 1$ - показатель сцепления поверхностей трещин; $J_w = 1$ - фактор наличия воды в трещинах; $SRF = 15$ - фактор высокого давления в массиве. По Q -рейтингу полученное значение ($Q = 3,76$) для богатых руд по степени устойчивости находится ближе к средне устойчивым, а горный массив, сложенный богатыми рудами, относится к средним.

Для выбора оптимального вида крепи с использованием полученных результатов рекомендуется использовать диаграмму, разработанную Норвежским геомеханическим институтом (рис. 4).

Для ширины выработки (пролета) 5,2 м и значении $Q = 3,76$ рекомендуется анкерное крепление железобетонными анкерами длиной 1,6 м с расстоянием между анкерами $a = 1,6$. Диаметр арматуры анкера 20 мм.

По рекомендациям [2] с данными характеристиками богатые руды относятся к средне нарушенным породам и для разведочных выработок шириной до 6 м применяется крепление железобетонными анкерами с длиной анкера 1,7 м и расстоянием между анкерами $a = 0,7$ м. Диаметр арматуры анкера 18 мм. Более густая сетка установки анкеров принята из-за срока службы выработки более года и последующего попадания ее в зону влияния очистных работ.

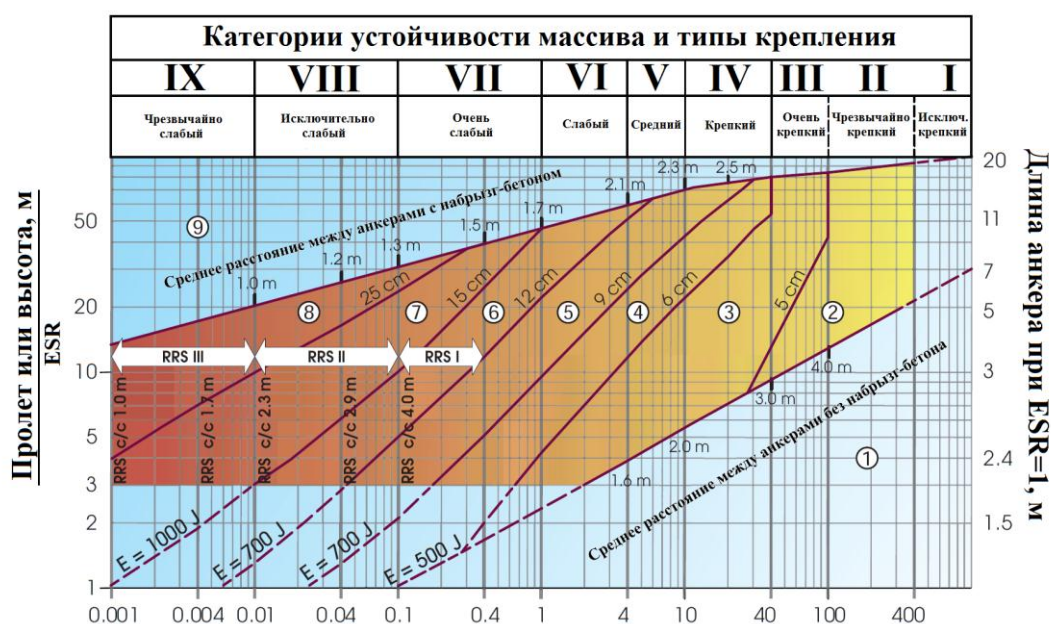


Рис. 4. Диаграмма параметров крепи в зависимости от Q-рейтинга

Можно сделать вывод, что при определении качественной характеристики (RQD) и рейтинга (RMR) по зарубежным методикам для богатой руды шахты «Скалистая» получаются сопоставимые результаты с существующими рекомендациями [2] по характеру нарушенности пород и рекомендациям условий поддержания выработок. При этом, зарубежные методики не учитывают влияние на выработки очистных работ и промышленных взрывов [7,8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галаов Р.Б, Кисель А.А., Андреев А.А., Зубков В.В. Оценка напряженного состояния рудного массива залежи С-2 шахты «Скалистая» до начала очистных работ // Горный журнал, №7, 2016.– с. 10-13.
2. Рекомендации по креплению, поддержанию и охране разведочных, капитальных, подготовительных, нарезных и очистных выработок на рудниках «Октябрьский», «Таймырский» и «Комсомольский» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель». – Норильск: 2011.
3. Bieniawsky Z.T. Case studies: prediction of rock mass behavior by the geomechanics classification // Second Australia – New Zealand Conference on geomechanics, 1975, p. 36-41.
4. Beniauwski Z.T. Engineering rock mass classification. Wiley, New York, 251 p., 1989.
5. Зенько Д.К., Узбекова А.Р. Основные факторы, влияющие на устойчивость массивов в критериях Беньявского (RMR) и Бартон (Q) // ГИАБ, 2004. - с. 273-275.
6. Barton, N.R. (2002). "Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39 (2): 185–216.
7. Наговицин Ю.Н., Кисель А.А., Тапсиев А.П., Усков В.А. Критерии выбора типа и расчета параметров крепи горизонтальных выработок на рудниках Норильского промышленного района. – Горный журнал, №6, 2015. – с. 74-80.
8. Тапсиев А.П., Усков В.А. Об особенностях выбора типа крепи нарезных выработок в зоне влияния очистных работ рудников Талнаха // ФТПРПИ. – 2015. – № 6, с 151-155.

© Ю. Н. Шапошник, В. А. Усков, 2017

ВЫДЕЛЕНИЕ МЕТАНА ИЗ КРАЕВЫХ ЧАСТЕЙ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОТРАБОТКИ СИСТЕМОЙ ДСО

Владимир Аркадьевич Скрицкий

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, тел. (383)205-30-30, доп. 194, e-mail: scritsky@mail.ru

Описан механизм снижения количества метана, поступающего из отрабатываемого угольного пласта в очистной забой, при высоких скоростях подвигания лавы.

Ключевые слова: метан, углепородный массив, опорное горное давление, механодеструкция, скорость отработки.

METHANE EMISSION FROM COAL-SEAM SELVAGE IN LONGWALL MINING WITH CAVING

Vladimir A. Skritsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Leading Researcher, Underground Coal Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 194, e-mail: scritsky@mail.ru

The mechanism to reduce methane emission from the productive coal seam to a stoping face at high rates of longwall advance is described.

Key words: methane, coal-ore mass, bearing pressure, mechanical destruction, mining rate.

В настоящее время установлено, что при отработке выемочных столбов системой ДСО метан по местам выделения распределяется следующим образом: 20% – непосредственно в лаву преимущественно из отрабатываемого выемочного столба; 80% – в выработанном пространстве из окружающего углепородного массива и из отрабатываемого выемочного столба [1-3]. На рисунке представлены схемы выделения метана в выработанное и в призабойное пространство действующего выемочного участка при отработке пологого пласта.

В выработанное пространство, формирующееся по мере отработки выемочного столба, метан поступает как из подрабатываемого и надрабатываемого углепородных массивов, так и из примыкающих к выработанному пространству краевых частей пласта.

Из подрабатываемого и надрабатываемого углепородных массивов метан в основном выделяется в процессе формирования в выработанном пространстве купола обрушения пород. А так как обрушение пород кровли и разгрузка почвы пласта от горного давления происходят по мере подвигания очистного забоя, то зона, в которой в основном происходит выделение метана из надрабатываемого и подрабатываемого массивов, примыкает к лаве и перемещается вслед за ней. Протяженность этой зоны от линии очистной выемки пласта (от лавы) простирается на 40-50 м вглубь выработанного пространства.

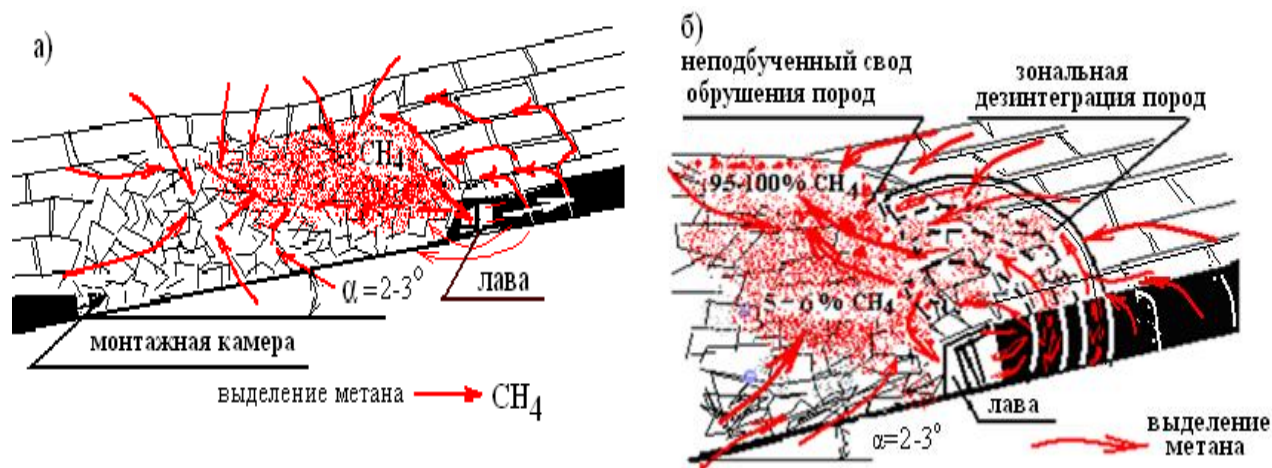


Рис. Выделение метана из углепородного массива и пути его миграции в пределах выемочного участка по мере подвигания очистного забоя:

а) в выработанном пространстве; б) в призбойном пространстве

Из отрабатываемого пласта максимальное поступление метана в выработанное пространство происходит из краевой части пласта, когда на неё начинает воздействовать опорное горное давление (ОГД). Опорным горным давлением на глубине от 4 до 10 м от кромки пласта выполняется механическая работа по деформации и разрушению углепородного массива с образованием радиальных зонально-дезинтегрированных заколов. Разрушение самого пласта происходит в упругопластическом режиме с преодолением сил трения, при котором выделяется тепло, в результате чего температура угля возрастает на 35-40°C и более, в зависимости от величины ОГД [4]. А так как это происходит в замкнутом объеме и при повышенном ОГД, то одновременно в краевой части пласта начинают протекать механохимические процессы, при которых происходит разложение угля с образованием метана – «дополнительного» метана.

При механохимическом процессе образование метана происходит в плоскостях проскальзывания угольных пропластков относительно друг друга под давлением превышающем предел прочности угля ($> 5-6$ МПа) [5, 6]. Причем чем выше величина ОГД, воздействующего на краевую часть пласта, и скорость перемещения зоны ОГД, тем большее количество «дополнительного» метана образуется. По мере роста скорости подвигания очистного забоя, в выработанном пространстве возрастает протяженность зоны интенсивного выделения метана в выработанное пространство. Причем, при увеличении скорости подвигания очистного забоя, прирост количества метана, поступающего в выработанное пространство, происходит в основном за счет «дополнительного» метана из краевых частей пласта.

Помимо образующегося «дополнительного» метана в зоне механодеструкции пласта, в результате повышения температуры угля, в газообразное состояние переходит часть адсорбированного и абсорбированного в пласте метана. Следует отметить, что основная часть метана «дополнительно» образовавшегося из угля и десорбированного из угля поступает не в очистной забой, а по заколам, возникшим в результате

зональной дезинтеграции углепородного массива, перетекает в расслоившиеся породы кровли, и далее, минуя очистной забой, поступает в выработанное пространство.

На рис. 1^б представлена принципиальная схема, как изнутри краевой части пласта, подвергнувшейся воздействию ОГД, происходит выделение метана в выработанное пространство, минуя очистной забой. Таким же образом «дополнительный» метан образуется и выделяется в выработанное пространство из краевых частей пласта и угольных целиков, остающихся в выработанном пространстве, когда они оказываются под воздействием ОГД после отхода очистного забоя.

Из выполненного анализа следует, что ОГД, воздействуя на краевые части угольного пласта, запускает процесс образования метана из угля, обусловленный механохимическим эффектом, который проявляется при механодеструкции угля в замкнутом объеме под большим давлением.

При высокой производительности очистного забоя возрастает ОГД, воздействующее на краевую часть пласта. В результате количество метана, поступающее в выработанное пространство из зоны механодеструкции краевой части отрабатываемого пласта, возрастает. В результате выноса метана в выработанное пространство изнутри краевой части выемочного столба, выемочный столб дегазируется. Это объясняется тем, что значительная часть адсорбированного и абсорбированного в пласте метана в зоне ОГД переходит в газообразный вид и, минуя очистной забой, поступает в выработанное пространство. Следовательно, чем выше производительность выемочного участка, тем сильнее дегазируется выемочный столб, примыкающий к очистному забою. Поэтому при высокопроизводительной отработке выемочных участков в выработанное пространство метана выделяется больше, нежели чем в очистной забой.

ОГД, воздействуя на выемочный столб, по сути, совершает не только работу по механодеструкции пласта в его краевой части, но и производит весьма эффективную дегазацию выемочного столба перед очистным забоем, что в проектах отработки выемочных столбов практически не учитывается. При используемых в настоящее время технологических схемах отработки пологих пластов практически весь метан, поступающий в выработанное пространство, скапливается в куполе обрушения пород, примыкающем к очистному забою (см. рис. 1^б), откуда его удаляют, расходуя большое количество воздуха и проветривая при этом выработанное пространство. Из-за поступления воздуха в выработанном пространстве повышается опасность возникновения очагов самовозгорания угля. Кроме того, не утилизируя угольный метан, а выбрасывая его, в атмосферу оказывают негативное воздействие на экологию.

Чтобы минимизировать перечисленные вредности и опасности достаточно в пределах выемочного участка изменить направление отработки выемочных столбов – с восходящего на нисходящее. Метан, выделяющийся в выработанное пространство, станет скапливаться в куполе обрушения пород около монтажной камеры, откуда в пригодной для утилизации концентрации он будет отбираться в дегазационный трубопровод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Звягильский, Е.Л. Управление метановыделением на выемочных участках угольных шахт /Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, О.И. Касимов.- Донецк: Ноулидж, Донецкое отделение, 2013. - 125 с.

2. Минеев С.П. Исследование метановыделения в выработки в сложных условиях / С.П. Минеев, М.В. Лыжков, В.В. Шевченко, С.П. Матвий // В сб. тр. конф. «НГУ» «Перспективы развития строительных технологий». – Днепропетровск – 2009. – С. 144-148.
3. Минеев, С.П. Особенности оценки метановыделения в выработки выемочного участка /С.П. Минеев, М.В. Лыжков, В.В. Шевченко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. /ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск. – 2013. - Вып. 111 – С. 112-119.
4. Попов В.Б. Влияние горного давления на формирование в выработанном пространстве зон с повышенной температурой угля /В.Б. Попов, В.А. Скрицкий// В сб. научн. тр. РосНИИГД. – Кемерово. – 2000. – С. 95-97.
5. Малинникова О.Н. Образование «дополнительного» метана при техногенном воздействии на угольный пласт. / Труды конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (28 июня-2 июля 2010 г.). Том II. «Геотехнология»// – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – С. 185-190.
6. Малинникова О.Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты. Автореферат диссертации д.т.н. – М., ИПКОН. – 2011. – 47 с.

© В. А. Скрицкий, 2017

О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ШВЕДСКОГО ВАРИАНТА СИСТЕМЫ ДОБЫЧИ РУД С ПОДЭТАЖНЫМ ОБРУШЕНИЕМ

Евгений Павлович Русин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики, тел. (383)205-30-30, доп. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Станислав Борисович Стажевский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией прикладной геомеханики, тел. (383)205-30-30, доп. 331, e-mail: gmmlab@misd.ru

Для современного этапа развития шведского варианта технологии добычи руд с подэтажным обрушением характерно стремление к улучшению ее экономических показателей за счет увеличения масштаба системы. Эта тенденция, в совокупности с внутренне присущими технологии недостатками, приводит к существенным нарушениям формы зоны течения раздробленной руды при выпуске из отбитого слоя, нестационарному ее истечению, раннему началу разубоживания и скачкам содержания пустых пород в горной массе в ходе выпуска, в итоге – к ухудшению показателей полноты и качества извлечения полезного ископаемого. Для установления условий возникновения этого так называемого нарушенного типа течения и разработки способов его предотвращения с целью дальнейшего совершенствования рассматриваемого варианта системы необходимы специальные исследования.

Ключевые слова: добыча руд, подэтажное обрушение, торцовый выпуск, нарушенное течение, потери руды, разубоживание.

SWEDISH VERSION OF SUBLEVEL CAVING ORE MINING SYSTEM: STATE-OF-THE-ART AND PROSPECTS

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Stanislav B. Stazhevsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head of Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 331, e-mail: gmmlab@misd.ru

Under consideration is the Swedish version of the sublevel caving ore mining method. It's typical of its contemporary state to improve the production economics by means of enlarging the mining method scale. The trend in combination with the sublevel caving internal inherent drawbacks creates conditions for extreme disturbance of the broken ore flow zone shape, nonsteady flow, early start of dilution, and waste content pulsation during blasted ring draw, these resulting in worsening the overall recovery and dilution rates. The demand is explicit for a special target research to determine conditions for the so-called disturbed type flow appearance and to find ways for its prevention with the purpose of further perfection of the mining method version under consideration.

Key words: ore mining, sublevel caving, frontal ore draw, disturbed flow, ore loss, dilution.

Система подземной отработки полезных ископаемых с подэтажным обрушением и торцовым выпуском под обрушенными породами [1] (далее – СПО) является одной из эффективных систем массовой добычи руд. Ее современный «шведский» вариант [2], называемый так в соответствии с регионом происхождения [3] – один из наиболее распространенных в мире (рис. 1 [4]). В соответствии с этим вариантом обрабатываемый блок делят на подэтажи, каждый из которых имеет собственный выпускной горизонт. Оработку подэтажей ведут в нисходящем порядке ромбовидными в вертикальном поперечном сечении 2-2' панелями. Рудный массив разбуривают вертикальными или крутонаклонными веерами восходящих скважин по всей длине панели из ортов. Взрывание производят послойно в отступающем порядке. Каждый последующий слой взрывают после выпуска горной массы, образованной в предыдущем слое. Доставку отбитой руды до рудоспуска осуществляют погрузочно-доставочными машинами.

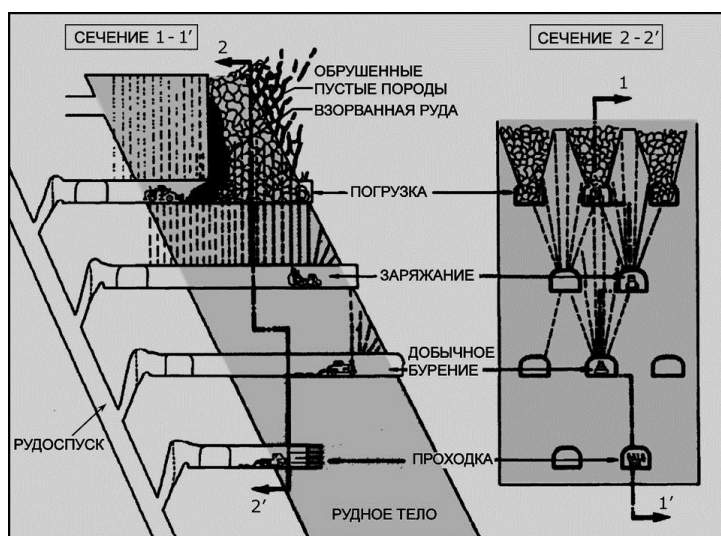


Рис. 1. Шведский вариант СПО

Благодаря своим общеизвестным достоинствам [2, 5], СПО приобрела заслуженную репутацию «малозатратной фабрики руды» [5] и получает все большее распространение в мире. С расширением использования на подземных горных работах самоходного оборудования она начала укореняться на таких предприятиях России как: АО «Апатит», ПАО «Северсталь», АО «ГМК «Дальполиметалл», ОАО «Евразруда», а также на рудниках Казахстана и Киргизии.

Дальнейшего повышения эффективности СПО стремятся достичь за счет увеличения ее масштабов [3, 6]. Так, за период с 1983 по 2000 гг. на железных рудниках ЛКАВ высоту подэтажа удвоили, мощность отбиваемого слоя и диаметр взрывных скважин увеличили на 70% и 80 % соответственно. В результате тоннаж руды в единичном слое возрос десятикратно. В настоящее время на данных предприятиях высота подэтажа достигает 28.5 м, а в некоторых случаях – 30 м [3]. Однако при этом, как выяснилось, создаются условия для ухудшения показателей извлечения и технико-экономических в целом передовой системы. Основную причину тому специалисты видят в возрастании, в связи с указанными изменениями, нестационарности режима течения горной массы [3, 7], что приводит к отклонению формы фигуры выпуска от проектной [8, 9].

Ранние рекомендации по конструированию системы опирались на принятую в свое время теорию эллипсоида выпуска [2, 8, 9]. Она была создана на основе наблюдений за процессом истечения сыпучих материалов из бункеров и предполагала равномерное стационарное движение перерабатываемого продукта в емкости вплоть до выхода из нее. Однако практика крупномасштабной добычи руды с использованием СПО [6, 10], а также последние натурные эксперименты [11] дали повод сомневаться в применимости теории эллипсоида выпуска при дальнейшем совершенствовании системы. На это, прежде всего, указывают чрезвычайно раннее поступление в выпускную выработку пустой породы и всплески ее повышенного содержания в горной массе по ходу извлечения раздробленного полезного ископаемого [12]. Шведские горняки отмечают, что обычный для модельных экспериментов плавный рост разубоживания в процессе выгрузки отбитого слоя в условиях крупномасштабной СПО является скорее исключением, чем правилом [12]. Российские рудники, принявшие на вооружение шведский вариант СПО в практически калькированном виде, испытывают те же сложности.

Новейшие промышленные эксперименты [11] показали, что при геометрических размерах, характерных для крупномасштабной СПО, фигура выпуска имеет неправильную отличающуюся от эллипсоида и изменяющуюся от слоя к слою форму. В качестве примера на рис. 2 [11 – с изменениями] приведены три сечения области выпуска руды, полученные в одном из натурных опытов.

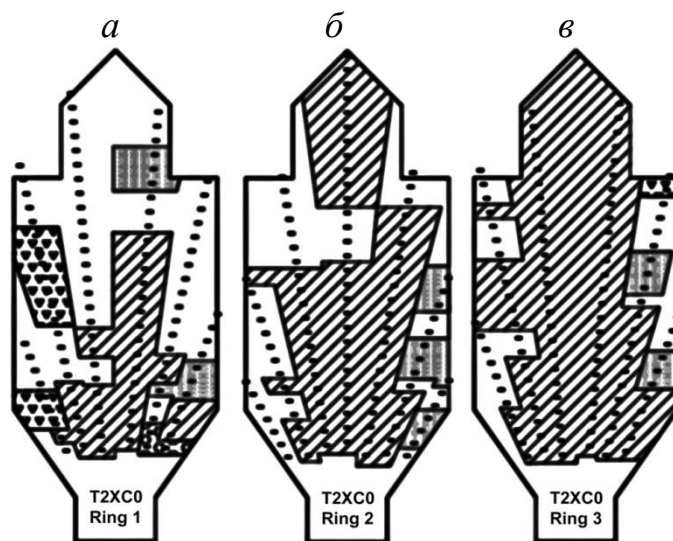


Рис. 2. Конфигурация областей выпуска в отбитом слое в трех плоскостях параллельных плоскости взрывных скважин и отстоящих от нее на:

а) 1,95 м; б) 1,3 м; в) 0,65 м

Течение, характеризующееся вышеуказанными особенностями и отличающееся от «лабораторного» стационарного, получило название нарушенного (disturbed flow) [13]. Его особенности изучались в работах [10, 11, 14] и ряде других, но до сих пор исчерпывающего объяснения так и не получили. По мнению авторов [3], недостаточное понимание фундаментальных процессов, происходящих в СПО, не позволяет современную конструкцию системы с подэтажным обрушением считать оптимальной.

Анализ механики гравитационного торцового выпуска в СПО заставляет предположить, что проявлению продемонстрированных выше нежелательных явлений, по-видимому, способствует, в частности, малая величина отношения мощности a отбиваемого слоя к его высоте h . Вероятно, для горной массы с конкретными физико-механическими характеристиками, свойствами и грансоставом должно существовать собственное пороговое значение отношения $k_h = a/h$, с которого в процессе ее выпуска начнет проявляться неустойчивость. Подтверждением этому могут служить результаты полномасштабного промышленного эксперимента, проведенного компанией Хебей Коппер Майн (Hebei Copper Mine) на руднике Лонгтан (Lóngtan), Китай [15]. В нем при исходных величинах $h \approx 50$ м и $a = 8.4$ м, то есть при коэффициенте $k_h = 0.17$, получена форма фигуры выпуска, близкая к проектному эллипсоиду. Вместе с тем, при $k_h = 0.06-0.08$ (то есть в 2.1-2.8 раза меньшем) в аналогичных по масштабу шведских и австралийских экспериментах зафиксирована нерегулярная форма фигуры выпуска [11, 12].

Весьма существенным аспектом из тех, что оказывают отрицательное влияние на стационарность процесса истечения руды, является ее неконтролируемое дробление при взрывной отбойке, а отсюда, появление в выпускаемом материале негабаритов [3, 14, 16]. Отмеченные негативные факторы накладываются на внутренние недостатки присущие самой системе. Такими являются: значительная величина контактной поверхности между отбитым полезным ископаемым и обрушенной пустой породой, а также близость этого контакта к месту погрузки горной массы. В крупномасштабной СПО все перечисленное приводит к значительным отклонениям формы фигуры выпуска отбитой руды от идеальной теоретической, нестационарному ее истечению из обрабатываемых геопространств, в итоге – к ухудшению показателей полноты и качества извлечения полезного ископаемого.

Изложенное свидетельствует о том, что знаний, накопленных к настоящему времени в области механики гравитационного течения разрушенных горных пород, для создания оптимальных вариантов системы подэтажного обрушения недостаточно. К такому же выводу приходят «законодатели» в области СПО – шведские горняки, а с ними специалисты ряда других стран [3, 7, 17, 18]. Это же подчеркивается в «Стратегической программе исследований и инноваций шведской горнодобывающей и металлургической промышленности» [19], рассчитанной на период до 2030 г. В программе делается особый акцент на том, что область науки, изучающая поведение фрагментированной горной породы, все еще находится в «зачаточном состоянии». Поэтому, следуя [19], для улучшения показателей извлечения руд при добыче требуется приложение серьезных усилий в сфере НИР и ОКР.

Таким образом, возрастающий интерес к технологии подэтажного обрушения, ее перспективность, нацеленность на выход в совершенствовании системы на передовые в мире позиции требуют быстрее развития в стране работ по механике гравитационного течения существенно гетерогенных сыпучих сред. Это означает необходимость проведения в данной области более широких и детальных, чем ранее, экспериментальных и теоретических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dunstan, G., Power, G. Sublevel Caving. – Darling., P. (ed.) SME Mining Engineering Handbook, 3rd Edition. – Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2011. – Pp. 1417-1436.
2. Kvapil, R. The mechanics and design of sublevel caving systems. – Gertsch, R.E. and Bullock, R.L. (eds.) Techniques in underground mining: Selections from underground mining

- methods handbook. – Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1998. – Pp. 621-653.
3. Hustrulid, W., Kvapil, R. Sublevel Caving – past and future. – Schunnesson, H., Nordlund, E. (eds) Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin 2008, 9–11 June 2008, Luleå, Sweden. – Luleå University of Technology Press, Luleå, Sweden. – 2008. – Pp. 107–132.
 4. Kvapil, R. Sublevel Caving. – Hartman, H.L. (ed.) SME Mining Engineering Handbook, 2nd Edition. – SME, Littleton, Colorado. Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992. – Pp. 1789-1814.
 5. Bull, G., Page, Ch. Sublevel caving – today's dependable low-cost 'ore factory'. – Chitombo, G. (ed.) Proceedings MassMin 2000, 29 October to 2 November 2000, Brisbane, Queensland, Australia. – Australia, Victoria, Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – 2000. – Pp. 537–556.
 6. Rustan A. Kompendium I Skivras – Ochblockkrasbrytning. Tekniska Hogskolan i Luleå, 1994, 125 p.
 7. Sustainable mining and innovation for the future – research, development and innovation program. August 2012. – Lulea, Sweden: Rock Tech Centre, Lulea University of technology, 2012. – 51 p.
 8. Kvapil, R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bins // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. – 1965. – Vol. 2. – No. 1. – Pp. 25-41.
 9. Kvapil, R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bins in mines – part II: coarse materials // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. – 1965. – Vol. 2. – No. 3. – Pp. 277-304.
 10. Hustrulid, W. Method selection for large scale underground mining. – Chitombo, G. (ed.) Massmin 2000. – AusIMM, Melbourne. – 2000. – Pp. 29-56.
 11. Brunton, I.D., Fraser, S.J., Hodgkinson, J.H., Stewart, P.C. Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – Vol. 47. – No. 4. – 2010. – Pp. 647-656.
 12. Quinteiro, C., Hustrulid, W., and Larsson, L., Theory and practice of very large scale sublevel caving. – Hustrulid, W., Bullock, R. (eds.) Underground Mining methods – Engineering Fundamentals and International Case Studies. – SME, Littleton, Colorado, USA. – 2001. – Pp. 381-384.
 13. Wimmer, M. Gravity flow of broken rock in sublevel caving (SLC) – State-of-the-art. – Swebrec Report 2010:P1. – Swedish Blasting Research Centre, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden. – 2010. – 58 p.
 14. Стажевский С.Б. Об особенностях течения раздробленных горных пород при добыче руд с поэтажным обрушением // ФТПРПИ. – 1996. – № 5. – С. 72–89.
 15. Chen, J.Y., Boshkow. S. Recent Development and Application of Bulk Mining methods in the People's Republic of China. – Int. Conf. on Caving and Sublevel Stoping, 1981. – Denver, USA: SME-AIME, 1981. – Pp. 393-418.
 16. DeCagné, D.O., McKinnon, S.D. The influence of Blasting Fragmentation on Ore Recovery in Sublevel Cave Mines. – Proceedings of Alaska Rocks 2005, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions, Anchorage, Alaska, June 25-29, 2005. – ARMA/USRMS, 2005.
 17. Brady, B.H.G., Brown, E.T. Rock mechanics for underground mining, 3rd ed. – Dordrecht: Kluwer; 2004.
 18. Steffen, S., Kuiper, P. Maximising Ore Recovery and the Implications for Cave Monitoring and Management Practices - Application of the Smart Marker System in Block and Sub-Level Mines. – Massmin 2012, June 2012. – AusIMM, Melbourne. – 2012.
 19. Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). – Lulea, Sweden: Rock Tech Centre. – 2013. – 104 p.

© Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, 2017

ГРУНТОВЫЕ АНКЕРЫ С ГИБКОЙ ТЯГОЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ: ТЕХНОЛОГИЯ УСТАНОВКИ, МЕТОД РАСЧЕТА

Евгений Павлович Русин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики, тел. (383)205-30-30, доп. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Гил Нам Хан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики, тел. (383)205-30-30, доп. 193, e-mail: gmmlab@misd.ru

Рассматриваются грунтовые анкеры с гибкой тягой, несущая способность которых по сравнению с традиционными конструкциями повышена за счет силы трения между тягой и промежуточной опорой (Э-анкеры). На примере сооружения временного крепления котлована станции метрополитена описана технология установки Э-анкера. Приведен вывод формулы для инженерной экспресс оценки его несущей способности.

Ключевые слова: грунтовый анкер, гибкая анкерная тяга, промежуточная опора, сила трения, несущая способность, инженерная формула, технология установки, котлован, временное крепление.

GROUND ANCHORS WITH A FLEXIBLE TENDON AND AN INTERMEDIATE SUPPORT: INSTALLATION PROCEDURE, ENGINEERING CALCULATION METHOD

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Guil Nam Khan

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 193, e-mail: gmmlab@misd.ru

Under consideration are ground anchors (E-anchors) with flexible tendon, bearing capacity of the anchors being greater at the expense of friction force between tendon and an intermediate support as compared to that of conventional structures. The procedure for E-anchor installation is described on the case study, viz., construction of subway-pit temporary support. Formula for engineering express-evaluation of an E-anchor bearing capacity is derived.

Key words: ground anchor, flexible anchor tendon, intermediate support, friction force, bearing capacity, engineering formula, installation procedure, pit, temporary support.

В механике известен эффект, который проявляется при огибании цилиндрической опоры натянутой гибкой нитью и заключается в экспоненциальном нарастании сдвигающей силы относительно удерживающей при увеличении угла контакта

между нитью и опорой. Соотношение между этими силами описывается формулой Эйлера [1]. В ИГД СО РАН предложено данный эффект (для краткости назовем его «эйлеровским») использовать в целях повышения несущей способности анкеров с гибкой тягой. При этом роль опоры выполняет смежная тяге область породного или грунтового основания. Тягу вводят в контакт с ней либо путем выполнения монтажной скважины анкера искривленной [2] либо, в случае прямолинейной скважины, посредством нагружения анкера под некоторым углом к ее оси [3].

Эффективность рассматриваемого способа увеличения несущей способности анкеров такого типа (Э-анкеров) подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями [4]. Если основание сложено грунтами, в особенности слабыми, то для улучшения эксплуатационных свойств Э-анкеров целесообразно ввести в их конструкцию промежуточную опору. Последняя должна иметь развитую поверхность контакта с основанием и фрикционно взаимодействует с огибающей ее анкерной тягой. Физические и численные эксперименты показали, что введение промежуточной опоры в конструкцию Э-анкеров позволяет существенно улучшить (сделать более жесткой) их нагрузочную характеристику [5].

Рассмотрим технологию установки Э-анкера на примере временного крепления котлована станции метрополитена (рис. 1). Последовательность монтажных операций в этом случае включает:

- рытье приямка 4, проходку анкерной скважины 3 с использованием, например, машины «Форс» [6] 13, предназначенной для высокопроизводительного выполнения вертикальных и крутонаклонных скважин (рис. 1а);

- установку пяты 1 анкера с присоединенным к ней пассивным участком 2 тяги в анкерную скважину 3, ее тампонаж сыпучим заполнителем 7, установку промежуточной опоры 5 в приямке 4, рытье траншеи 6 (рис. 1б);

- укладку активной ветви 2' тяги, ее натяжение и закрепление на силовом поясе 10 посредством захвата-вороты 9, тампонаж приямка 4 и траншеи 6 сыпучим заполнителем 7 (рис. 1в). Элементы технологии успешно опробованы в натурных условиях на полигоне «Зеленая горка» ИГД СО РАН.

Для экспресс-оценки несущей способности Э-анкера с промежуточной опорой может быть использована формула Эйлера, в соответствии с которой предельное значение выдерживающей силы F равно

$$F = e^{f\alpha} F_0, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения гибкой тяги по поверхности промежуточной опоры, α – угол охвата гибкой тягой опоры в радианах, F_0 – предельное сопротивление пяты анкера выдергиванию. Основная проблема при определении выдерживающей силы по формуле (1) состоит в трудности нахождения силы F_0 . Для ее расчета получена инженерная формула

$$F_0 = \pi r_h^2 \sigma_h, \quad (2)$$

r_h – радиус пяты анкера, σ_h – нормальное к основанию пяты напряжение, равное

$$\sigma_h = \left(\frac{r_0}{r_h} \right)^k \sigma_0 + \operatorname{ctg} \beta \left[\frac{\gamma r_h \left[(r_0 / r_h)^{k+1} - 1 \right]}{k+1} + \frac{2c \left[(r_0 / r_h)^k - 1 \right]}{k} \right],$$

$r_0 = r_h + h \operatorname{tg} \beta$, $h \approx 10r_h$, $\beta = \pi/4 - \phi/2$, $k = 2[1 + \operatorname{tg} \phi(\xi \cos \beta + \sin \beta) \operatorname{ctg} \beta]$, γ, c, ϕ – объемный вес, сцепление и угол внутреннего трения, $\xi = \operatorname{tg}^2 \beta$, $\sigma_0 = \gamma(H - h)$, H – глубина заложения пяты анкера, $H \geq h$.

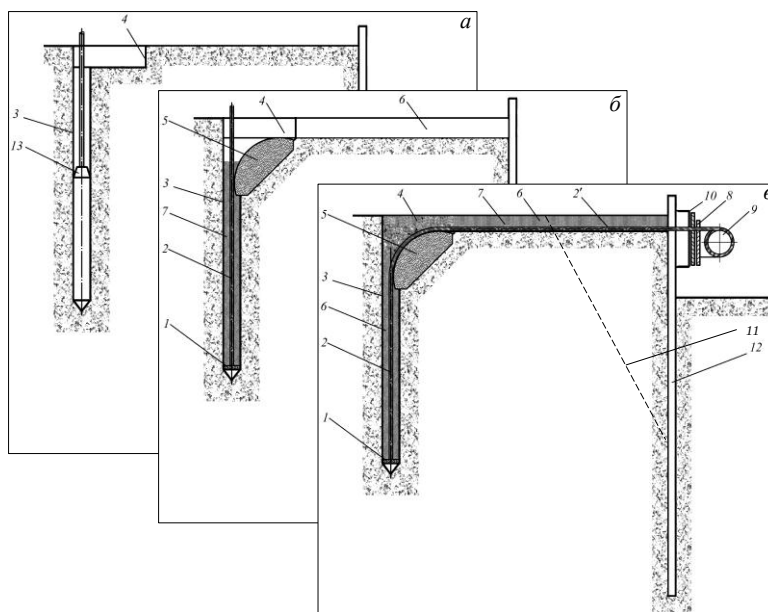


Рис. 1. Технология закрепления ограждения котлована станции метрополитена Э-анкерами:

1 – пята анкера; 2 – пассивный участок тяги; 2' – активный участок тяги; 3 – монтажная скважина анкера; 4 – прямик; 5 – опора; 6 – траншея для укладки троса; 7 – тампонажный сыпучий материал; 8 – подхват; 9 – тросовый захват; 10 – силовой пояс; 11 – граница призмы обрушения; 12 – ограждение котлована; 13 – машина «Форс»

На рис. 2 приведены экспериментальные 1 и расчетные 2 значения сопротивления F_0 пяты анкера выдергиванию. Опыты проводились с различными размерами r_h , равными соответственно 1.6, 3.3 и 4 см при $H = 1.2$ м. Расчеты проводились при следующих значениях параметров, входящих в формулу (2): $\gamma = 16677$ Н/м³; $c = 12$ кПа; $\phi = 30^\circ$. Проведенные исследования показывают, что расхождение цифр, полученных по формуле (2), с опытными не превышает 15%.

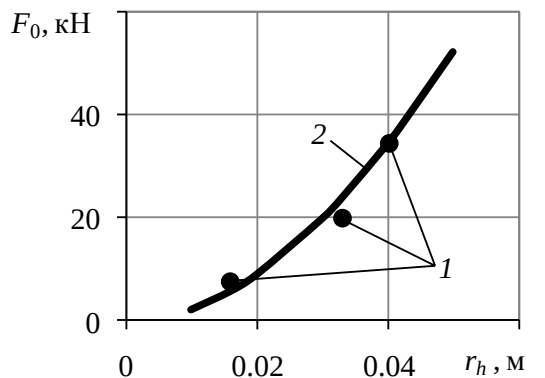


Рис. 2. Графики зависимости сопротивления F_0 пяты анкера выдергиванию от размера r_h его пяты: 1, 2 – экспериментальные и расчетные данные соответственно

Формулы (1) и (2) при известных значениях параметров Э-анкера, его промежуточной опоры и грунтового основания позволяют вычислять несущую способность проектируемого анкерного крепления с достаточной для практики точностью.

Таким образом, благодаря апробации отдельных технологических операций в натурных условиях и наличию надежного расчетного метода, технологию временного крепления ограждения котлована Э-анкерами можно считать готовой к промышленной проверке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутенин Н. В. Курс теоретической механики. В двух томах. Т. I: Статика и кинематика [Текст] / Н.В. Бутенин, Я. Лунц, Д.Р. Меркин. – 4-е изд., исправл. – М.: Наука, 1985. – 240 с.
2. Пат. 2061872 Российская Федерация, E21D 20/00. Способ установки анкера [Текст] / С.Б. Стажевский, Д. Колимбас, А.А. Крамаджян, Ю.М. Кашин; заявитель и патентообладатель Институт горного дела СО РАН. – № 5032403/03; заявл. 16.03.1992; опубл. 10.06.1996, Бюл. № 16. – 10 с.
3. Пат. 2457293 Российская Федерация, E02D 5/80. Способ сооружения грунтового анкера [Текст] / С.Б. Стажевский, А.А. Крамаджян, Е.П. Русин, Г.Н. Хан; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Сибирского отделения РАН. – № 2011101239/03; заявл. 12.01.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. – 6 с.
4. Крамаджян А. А. О повышении несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой [Текст] / А.А. Крамаджян, Е.П. Русин, С.Б. Стажевский, Г.Н. Хан // ФТПРПИ.– 2014.– № 6. – С. 96-106.
5. Об улучшении нагрузочной характеристики грунтовых анкеров с гибкой тягой / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 107–111.
6. Скачков К. Б. Усиление фундаментов набивными сваями. Глубинное уплотнение грунтов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10103/> (06.03.2017).

© Е. П. Русин, Гил Нам Хан, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РОТОРОВ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ

Евгений Юрьевич Русский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 339, e-mail: geomining@mail.ru

Рассмотрена конструкция ротора шахтного осевого вентилятора главного проветривания, определены основные параметры возмущенного воздушного потока, влияющие на возникновение вынужденных колебаний лопаток, найдены зависимости вибрационных напряжений в элементах ротора от параметров возмущенного воздушного потока; построены частотные диаграммы, связывающие зависимость собственных частот колебаний и частот возмущающих сил.

Ключевые слова: ротор осевого вентилятора, напряженно-деформированное состояние, возмущенный воздушный поток, вибрационная надежность.

RESEARCH OF VIBRATION RELIABILITY OF AXIAL FANS ROTORS OF THE MINE MAIN AIRING

Evgeny Yu. Russky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 339, e-mail: geomining@mail.ru

Construction of a rotor mine axial fan of the principal airing is considered, the key parameters of the perturbed air flow influencing origin of forced oscillations of blades are determined, dependences of vibrational tension are found in rotor elements from parameters of the perturbed air flow; the frequency charts, the connecting dependences of natural frequencies of oscillations and frequencies of the perturbing forces are constructed.

Key words: rotor of the axial fan, the intense deformed state, the indignant air stream, vibration reliability.

Эксплуатационная надежность является важнейшей характеристикой шахтных вентиляторов главного проветривания. Она в значительной степени зависит от запаса прочности и уровня вибраций основных узлов вентилятора. На узлы вентилятора действуют возмущения от воздушного потока, вызванные действием нестационарных аэродинамических сил, возникающих вследствие неравномерности течения потока при взаимодействии с ребрами корпуса, лопатками направляющего и спрямляющего аппаратов [1], а также от возмущений, обусловленных внезапными выбросами или взрывами.

Основным узлом шахтного осевого вентилятора является ротор. Его надежность, в основном, определяет работоспособность вентилятора. Ротор, в свою очередь, состоит из коренного вала и рабочего колеса (РК), которое включает в себя корпус и рабочие лопатки [2]. Рассмотрим вентилятор главного проветривания серии ВО [2], рабочее колесо которого имеет 8 сдвоенных листовых лопаток сварной конструкции. Коренной вал вентилятора через муфту соединен с трансмиссионным валом, который

через муфту кинематически связан с валом электродвигателя. Схема вентилятора показана на рис. 1.

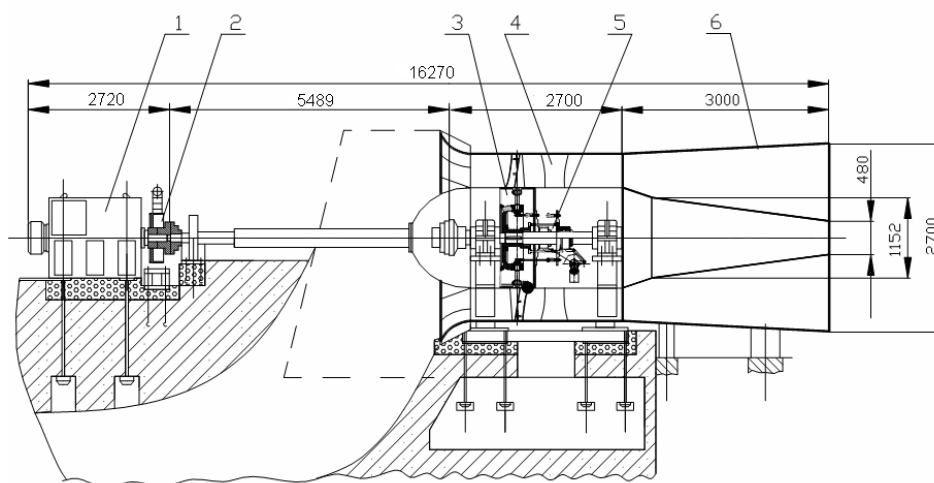


Рис. 1. Схема вентиляторного агрегата серии ВО:

1 – синхронный электродвигатель 630кВт, 750 об/мин, 6.0 кВ; 2 – электромагнитный тормоз; 3 – рабочее колесо с поворотными на ходу сдвоенными листовыми лопатками; 4 – неповоротные лопатки спрямляющего аппарата; 5 – механизм одновременного поворота лопаток рабочего колеса; 6 – диффузор

Рассмотрим взаимодействие возмущенного воздушного потока со сдвоенной лопаткой осевого вентилятора.

На рис. 2 показана схема сдвоенной листовой лопатки осевого вентилятора ВО-36К [2]. Данный вентилятор имеет следующие параметры: диаметр по концам лопаток $D = 3.6$ м, статическое давление $P_{sv} = 2550$ Па, мощность электродвигателя $N = 2000$ кВт.

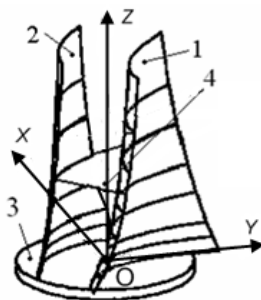


Рис. 2. Схема сдвоенной листовой лопатки:

1 – большая лопасть; 2 – малая лопасть; 3 – поворотное основание; 4 – перемычка

Анализ проводился методом конечных элементов, с использованием программного пакета Ansys.

Собственные частоты сдвоенной листовой лопатки вентилятора ВО-36К, рассчитанные в пакете Ansys, представлены на рис. 3 (а, б – изгибные формы колебаний, в – крутильная форма колебаний).

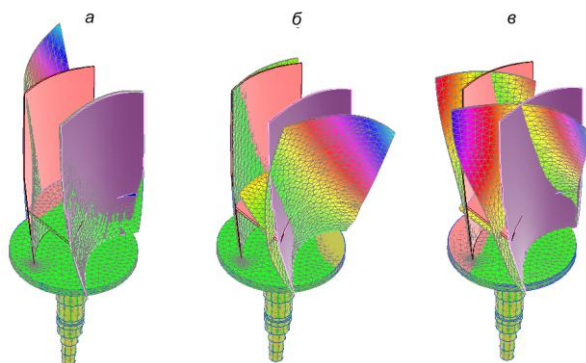


Рис. 3. Формы собственных колебаний двоянной листово́й лопатки РК:

а) первая форма колебаний (частота 66.5 Гц); б) вторая форма колебаний (частота 101.5 Гц); в) третья форма колебаний (частота 165.1 Гц)

Собственные частоты колебаний (рис. 4) составляют: по первой форме 66.5 Гц, по второй форме 101.5 Гц, по третьей форме 165.1 Гц. Основная возбуждающая частота – частота вращения ротора, равная 10 Гц. Наблюдается значительная отстройка собственных частот от основной возбуждающей частоты.

Лопатки, помимо постоянных нагрузок (таких, как центробежные силы, силы сопротивления воздушного потока, тяги и инерции при вращении ротора), испытывают действие циклически изменяющихся во времени возмущающих нагрузок, которые вызывают дополнительные динамические напряжения в лопастях [3]. При совпадении частоты возмущающей силы с одной из собственных частот лопатки наступает явление резонанса, характеризующееся значительным увеличением амплитуд колебаний. Резонансные явления наблюдаются также, когда собственная частота не равна, но кратна частоте возмущающей силы.

Резонансные колебания лопаток возникают в случаях, когда частоты их собственных колебаний f становятся равными или кратными числу оборотов ротора n , т.е. $f = k \cdot n$ [4]. Число кратности k определяется исходя из особенностей конструкции машины. Кроме того, для осевых вентиляторов опасные режимы могут возникать в результате появления колебаний лопаток под действием нестационарных аэродинамических сил, возникающих вследствие неравномерности течения воздушного потока при взаимодействии с ребрами, расположенными в проточной части корпуса, с направляющим аппаратом и лопатками спрямляющего аппарата. В этом случае числа кратности пропорциональны числу ребер направляющего аппарата N_p , а при реверсировании режима работы вентилятора и числу лопаток спрямляющего аппарата $N_{са}$. Колебания также могут быть вызваны явлением срывного флаттера, заключающегося в возникновении самовозбуждающихся колебаний лопаток вследствие взаимодействия аэродинамических сил с упругими силами в лопатках. В случае если энергия потока достаточна для поддержания этого процесса, то колебания будут незатухающими. Возникновению флаттера способствует срыв потока при обтекании лопатки с большими углами атаки. Обнаружено [1], что срыв потока может наблюдаться не на всех лопатках решетки, а только на их группе, и что зона срыва может перемещаться по окружности. Такое явление получило название вращающегося срыва. Значения резонансных частот для колебаний воздушного потока от ребер направляющего аппарата, лопаток спрямляющего аппарата и от вращающегося срыва можно записать в следующем виде [5]:

$$\omega_n^{(P)} = n N_P \omega, \quad \omega_n^{(CA)} = n N_{CA} \omega, \quad \omega_n^{(BO)} = n N_{BO} (1-\alpha) \omega,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – номер гармоники возбуждающих сил; α – угол между набегающим потоком воздуха и хордой профиля лопатки, $0 < \alpha < 1$, рад; $\omega_n^{(P)}$, $\omega_n^{(CA)}$, $\omega_n^{(BO)}$ – резонансные частоты колебаний воздушного потока от ребер направляющего аппарата, лопаток спрямляющего аппарата и от вращающегося отрыва соответственно, рад/с; ω – угловая частота вращения ротора, рад/с.

Для вентилятора ВО-36К при угловой скорости вращения рабочего колеса вентилятора $\omega = 62.82$ рад/с (600 об/мин), числе неподвижных лопаток – ребер направляющего аппарата $N_P = 12$ и лопаток спрямляющего аппарата $N_{CA} = 15$, зон отрыва во вращающемся потоке $N_{BO} = 2 - 4$, частоты возбуждающих сил, создаваемых ребрами направляющего аппарата, лопатками спрямляющего аппарата и вращающимся отрывом, записываются так [5]:

$$\omega_n^{(P)} = 12n\omega \text{ рад/с}; \quad \omega_n^{(CA)} = 15n\omega \text{ рад/с}; \quad \omega_n^{(BO)} = 4n\omega \text{ рад/с}.$$

Для определения влияния возмущающих частот на колебания лопатки, построим вибрационную диаграмму (рис. 4).

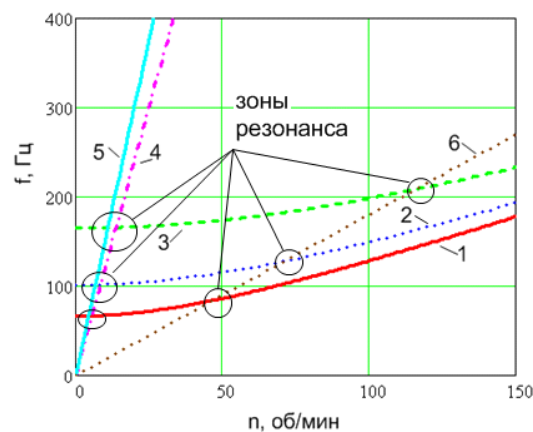


Рис. 4. Зависимость собственных частот колебаний сдвоенной листовой лопатки и возмущающих частот от числа оборотов двигателя:

1 – первая собственная частота; 2 – вторая собственная частота; 3 – третья собственная частота; 4 – возмущающая частота от лопаток направляющего аппарата; 5 – возмущающая частота от лопаток спрямляющего аппарата; 6 – возмущающая частота от отрыва во вращающемся потоке

Лучи, выходящие из начала координат (графики 4, 5, 6, рис. 5), представляют собой зависимости частот возмущающих сил от частоты вращения для первых гармоник. Абсциссы точек пересечения с кривыми собственных частот (графики 1, 2, 3, рис. 5) определяют границу зон резонансных частот вращения ротора.

Из анализа графиков следует, что при пуске вентилятора, лопатки проходят через несколько зон резонансов (рис. 5). Из-за кратковременности нахождения в этих зонах, а также вследствие незначительной энергии возмущенного воздушного потока от ребер направляющего аппарата, лопаток спрямляющего аппарата и возмущений от отрыва во вращающемся потоке, это не приведет к возникновению опасных напряже-

ний и деформаций в конструкции лопаточного узла. При выбеге вентилятора, для уменьшения времени нахождения в резонансных областях, необходим тормоз для электродвигателя вентилятора.

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

– для снижения вероятности возникновения вращающегося срыва, желательно эксплуатировать вентилятор с углами установки лопаток рабочего колеса не превышающими номинальных значений;

– при пуске ротор вентилятора проходит через несколько зон резонансов. Однако из-за кратковременности нахождения в этих зонах, опасности развития вибрационных напряжений нет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Н.А. Разработка реверсивных осевых вентиляторов главного проветривания шахт // Диссертация на соискание уч. степени д.т.н. – Институт горного дела СО РАН – Новосибирск–2001. – 282 с.

2. Клепаков И.В. Разработка нового ряда шахтных осевых вентиляторов главного проветривания / И.В. Клепаков, В.А. Руденко // Теоретические и эксплуатационные проблемы шахтных стационарных установок. – Донецк: ВНИИГМ им. М.М. Федорова, 1986. – С. 110–121.

3. Манушин Э.А. Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок / Э.А. Манушин, И.Г. Суровцев // М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

4. Козюрин С.В. Анализ частот и форм колебаний сдвоенных листовых лопаток рабочих колес осевых вентиляторов / С.В. Козюрин, Н.А. Попов // «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – Кемерово. – 2002. – С. 31-32.

5. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода: Учебник для вузов. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2000. – 496 с.

© Е. Ю. Русский, 2017

КОМПОЗИТНЫЙ ШАХТНЫЙ АНКЕР С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Екатерина Владимировна Рубцова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 174, e-mail: rubth@misd.ru

Юрий Михайлович Леконцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, тел. (383)205-30-30, доп. 178

В статье описан шахтный анкер, грузонесущий стержень которого выполнен из композиционного материала на основе волокон и полимерного связующего, в состав которого введены зерна ферромагнитного порошка. Ферромагнитные свойства материала грузонесущего стержня обеспечивают возможность удаления его разрушенных частей из угля с помощью магнитных улавливателей, что исключает негативное воздействие волокон композиционного материала на работу обогатительного оборудования.

Ключевые слова: анкер, грузонесущий стержень, композиционный материал, волокно, полимерное связующее, ферромагнитный порошок.

COMPOSITE MINE ANCHOR WITH FERROMAGNETIC PROPERTIES

Ekaterina V. Rubtsova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 174, e-mail: rubth@misd.ru

Yury M. Lekontsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Underground Coal Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 178

The paper describes a mine anchor, which load-carrying bar is made of a composite material based on fibers and a binding polymer with introduced ferromagnetic powder grains. Ferromagnetic properties of the load-carrying bar material provide an opportunity to remove destroyed parts of the anchor from coal by applying a magnetic catcher thus eliminating the negative effect of magnetic composite fibers on performance of coal-processing equipment.

Key words: anchor, load-carrying bar, composite material, fiber, binding polymer, ferromagnetic powder.

Крепление горных выработок и поддержание их в рабочем состоянии является одним из основных производственных процессов при подземной добыче угля. Последнее десятилетие во всем мире прослеживается четкая тенденция к расширению области применения композитной анкерной крепи [1]. Преимуществами композитных шахтных крепей являются: прочность композитного стержня на растяжение (выше чем, стального аналога в 2 раза), малый удельный вес анкера (легче стального в 4-5 раз), высокая коррозионная и химическая стойкость в условиях агрессивных сред, ис-

ключение фрикционного искрения, отсутствие сопротивления режущему инструменту выемочных или проходческих машин.

Несмотря на то, что композитный анкер легко срезается исполнительным органом комбайна и разрушенные фрагменты не оказывают негативного влияния на работу конвейера, наличие разрушенных частей анкера в угле, поступающем на обогатительную фабрику, создает проблемы при работе обогатительного оборудования. Связано это с тем, что грузонесущий стержень композитного анкера выполняется, как правило, из однонаправленного волокна (стеклянного, базальтового, угольного, органического или их комбинации) и может быть снабжен наружным слоем из перекрещивающихся или закрученных по спирали нитей или жгутов из аналогичных волокон. Наматывание содержащихся в обломках анкера волокон композиционного материала на вращающиеся элементы обогатительного оборудования может привести к выходу из строя механизмов оборудования, требует их остановки для прочистки, тем самым снижает производительность и долговечность оборудования.

Предлагается техническое решение, позволяющее устранить негативное воздействие волокон композиционного материала, образовавшихся после срезания анкера угольным комбайном, на работу обогатительного оборудования. Техническое решение защищено патентом РФ [2] и заключается в придании композиционному материалу, из которого изготовлен грузонесущий стержень, новых механических свойств.

Следует отметить очень важное преимущество композиционных материалов по сравнению с традиционными (металлы, дерево и т.п.) – это уникальное сочетание свойств (прочностных, деформационных, электрических, теплопроводных и других) и возможность управления этими свойствами путем изменения состава или технологии изготовления таких материалов. Так, в качестве полимерного связующего волокон грузонесущего стержня может использоваться композиция на основе полиэфирной, эпоксидной, винилэфирной или полиуретановой смол и их комбинации. Полимерное связующее для придания анкерам дополнительных свойств может содержать, например, до 35% мел, тальк, доломит, микрокальцит или их смесь в качестве добавок [3].

Для обеспечения возможности эффективного удаления разрушенных частей композитного анкера из угля с помощью магнитных улавливателей предлагается придать грузонесущему стержню анкера ферромагнитные свойства путем введения в состав полимерного связующего зерен ферромагнитного порошка.

На рис. 1 приведен пример исполнения композитного шахтного анкера с ферромагнитными свойствами. Анкер содержит грузонесущий стержень 1, выполненный сплошным в поперечном сечении, имеющий головную часть 2, снабженную винтовой канавкой 3, и хвостовик 4, снабженный резьбой 5 и гайкой 6. Грузонесущий стержень выполнен из композиционного материала на основе волокон 7 и полимерного связующего 8. В качестве волокон композиционного материала могут быть использованы стеклянные, базальтовые, органические и другие армирующие волокна или их комбинация. В состав полимерного связующего, склеивающего волокна композиционного материала, введены зерна 9 ферромагнитного порошка. Аналогичным образом, например, ферромагнитный порошок вводится как наполнитель в битумную смесь для изготовления магнитных прокладок в машиностроении.

В процессе отработки угольного пласта композитный шахтный анкер срубается исполнительным органом комбайна, при этом разрушенные части грузонесущего стержня из композиционного материала попадают вместе с отбитым углем на скребковый конвейер, затем перегружаются на ленточный конвейер. В зоне установки магнитных улавливателей разрушенные части грузонесущего стержня из композицион-

ного материала, обладающего ферромагнитными свойствами, эффективно удаляются из транспортируемого угля.

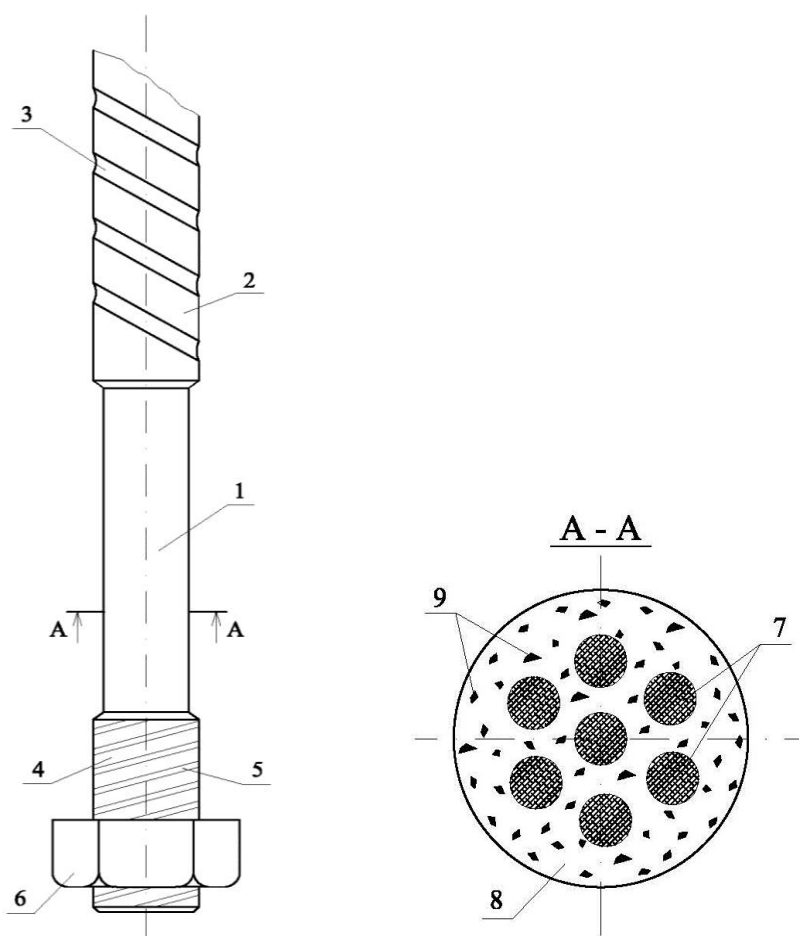


Рис. 1. Общий вид композитного анкера с ферромагнитными свойствами

Такая утилизация эффективна, т.к. предохраняет обогащенное оборудование от забивания его волокнами композиционного материала, исключает существенные затраты труда и времени на прочистку и ремонт оборудования. Введение в состав полимерного связующего для склеивания волокон композиционного материала зерен ферромагнитного порошка дополнительно повышает механическую прочность грузонесущего стержня, увеличивая тем самым несущую способность композитного шахтного анкера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильева О. А. Шахты получили российскую анкерную крепь, не имеющую аналогов // Уголь. – 2012. – № 6. – С. 28–29.
2. Патент РФ № 2593665 Композитный шахтный анкер / Леконцев Ю. М., Рубцова Е. В. – БИ № 22 от 10 августа 2016 г.
3. Патент РФ № 2303698 Композитный анкер / Суханов А. В., Асеев А. В., Сисаури В. И. – БИ № 21 от 27 июля 2007 г.

© Е. В. Рубцова, Ю. М. Леконцев, 2017

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ

Юрий Михайлович Леконцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, тел. (383)205-30-30, доп. 178

Екатерина Владимировна Рубцова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 174, e-mail: rubth@misd.ru

Александр Александрович Скулкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: chuppt@yandex.ru

В статье описаны конструкция и результаты испытаний в условиях подземных рудников бурового инструмента и устройств для выполнения в соляных породах скважин, отвечающих требованиям проведения тестов измерительного гидроразрыва. В их числе: буровой снаряд, щелеобразователь, нутромер.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, массив соляных пород, скважина, буровая коронка, шнек, дискообразная иницирующая щель.

DRILLING TOOL AND A DEVICE TO MAKE MEASUREMENT HOLES IN SALT ROCKS

Yury M. Lekontsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Laboratory of Underground Coal Mining, tel. (383)205-30-30, extension 178

Ekaterina V. Rubtsova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 174, e-mail: rubth@misd.ru

Alexander A. Skulkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 173, e-mail: chuppt@yandex.ru

The authors describe the design and data on underground tests of the drilling tool and the device for making holes in salt rocks according to the requirements for measurement hydrofracturing tests, including drilling string, splitter, hole gage.

Key words: measurement hydrofracturing, salt rock mass, a borehole, drilling head, auger, disc-shaped splitter.

Цикл экспериментальных исследований по определению параметров действующих полей напряжений, выполненный с использованием комплекса «Гидроразрыв» [1] на подземных рудниках ПАО «Уралкалий» в 2015 году, показал, что выполнить в соляном массиве прямолинейные измерительные скважины с качественной поверхностью и заданными геометрическими параметрами без специального инструмента весьма проблематично. Основными причинами, по которым подготовленные службами рудников скважины оказывались непригодными для выполнения измерительных операций, были следующие: смещения оси скважины с образованием ступенек; искривление направления скважины, выдавливание в скважину глиняных прослоек с затвердеванием выступов, неровности на поверхности скважины спирального вида, заштыбованность полости скважины.

В связи с этим возникла необходимость создания специального бурового инструмента, обеспечивающего выполнение в соляных породах скважин повышенной геометрической точности, отвечающих требованиям проведения тестов измерительного гидроразрыва. Для этих целей в ИГД СО РАН разработан комплект бурового инструмента и устройств, включающий буровой снаряд, щелеобразователь, нутрометр.

На начальном этапе были изготовлены два буровых снаряда, отличающиеся расположением шнека и калибратора. На рис. 1 приведен вариант комплектации снаряда с расположением шнека за калибратором. Снаряд состоял из буровой коронки диаметром 75,0 мм, забурника, калибратора на диаметр 76,0 мм и буровой штанги, представляющей собой трубу со спиралью шнека из стальной полосы толщиной 2,0 мм. Анализ известных технических решений по обоснованию параметров спирали шнека при бурении в соляных породах позволил установить, что оптимальными являются углы наклона спирали в диапазоне $12 \div 19^\circ$, шаг $61 \div 91$ мм. Исходя из этого, буровая штанга была изготовлена с параметрами: угол наклона спирали 15° , шаг 75 мм.

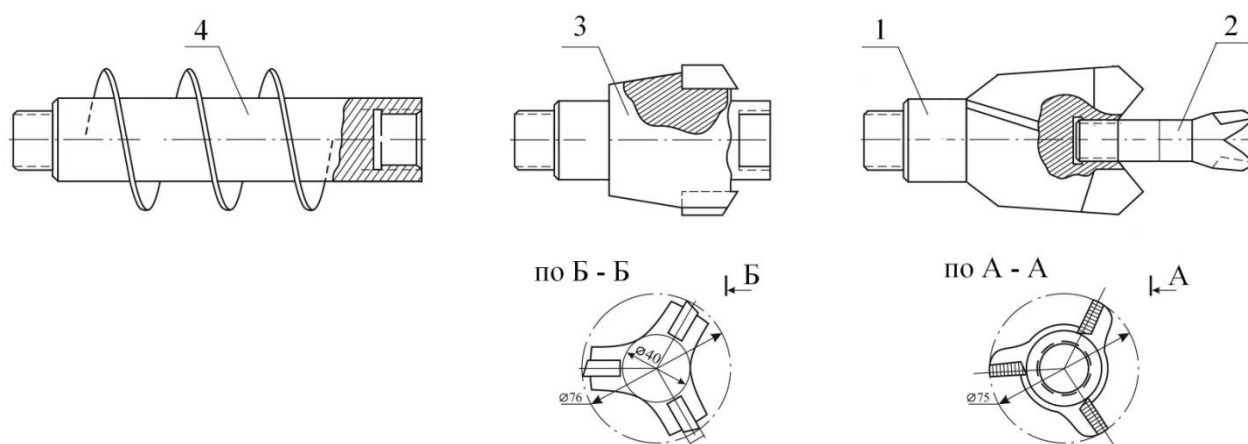


Рис. 1. Вариант комплектации бурового снаряда:

1 – буровая коронка; 2 – забурник; 3 – калибратор диаметра скважины; 4 – шнек

Результаты испытаний показали, что независимо от положения шнека, перед калибратором или за ним, очистка скважин от штыба получается не достаточной, калибрующий элемент препятствует выходу штыба. Конструкция бурового снаряда

была изменена и дальнейшее успешное применение получил буровой снаряд на базе специальной трехпёрной буровой коронки КДС 76/сп33 диаметром 76 мм и 60-сантиметровой шнековой штанги с наружным диаметром 74,0 мм (рис. 2). С использованием данного снаряда отбурено 13 измерительных скважин общей протяженностью порядка 120 м.

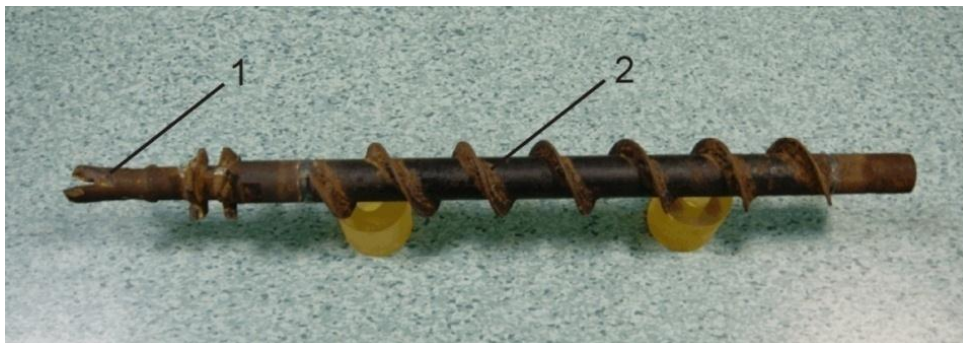


Рис. 2. Общий вид бурового снаряда

1 – заборник на базе коронки КДС 76/сп33; 2 – буровая штанга со шнеком

Для упрощения процедуры определения компонент действующих в массиве напряжений необходимо обеспечить ортогональную направленность трещины гидроразрыва к оси скважины. Создание трещины гидравлического разрыва в направлении перпендикулярном оси скважины может быть достигнуто путем предварительного нарезания на стенке скважины в зоне межпакерного пространства дискообразной иницирующей щели.

Работы по созданию устройств для нарезания дискообразных щелей в стенках солевых скважин были начаты в 2015 г., первоначальный вариант конструкции щелеобразователя описан в [2]. В 2016 г. было разработано и испытано на рудниках ПАО «Уралкалий» устройство для нарезания дискообразных иницирующих щелей, отличающееся меньшими габаритами и весом (рис. 3). Устройство навинчивается на штангу бурового станка с помощью переходника и наращиванием става штанг досылается до упора в забой скважины. Далее включается вращение и осевая подача бурового става со скоростью 1 мм за 100 оборотов. При этом корпус 1 устройства перемещается вместе с буровым ставом, «надвигается» на неподвижный толкатель 6, который опирается на оптекатель-упор 9. В результате происходит перемещение поршня 3 в сторону хвостовой части корпуса, сжатие пружины возврата 4 и выдвижение ножа 2 за границы корпуса рычагом 5. Конструктивно заложено, что полный выход ножа 2, выбуривающего щель, происходит при осевой подаче 35 мм. После нарезания щели вращение бурового става останавливают, при этом под действием пружины рабочего хода 8 происходит возвращение толкателя 6 в исходное положение, а под действием пружины возврата 4 нож 2 задвигается в корпус устройства и устройство извлекают из скважины.

На рис. 4 приведены снимки измерительной скважины с нарезанной при помощи описанного устройства иницирующей щелью.

Практика выполнения тестов гидроразрыва показала, что перед досылкой зонда в измерительную скважину необходимо знать ее реальный диаметр, с учетом которого следует подбирать размеры пакерных элементов для обеспечения радиального за-

зора между ними и стенками скважины не более 1–1,5 мм. Для этих целей создан экспериментальный скважинный нутромер (рис. 5).

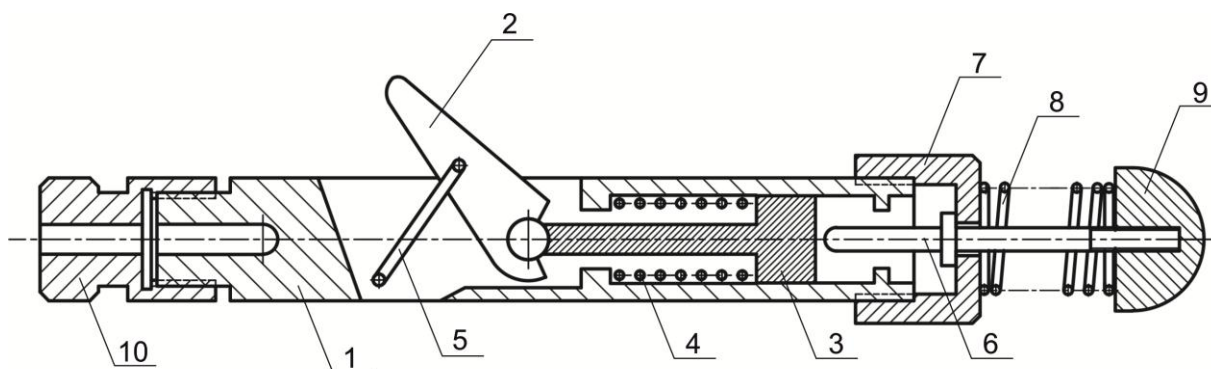


Рис. 3. Устройство для нарезания кольцевых щелей:

1 – корпус; 2 – нож; 3 – поршень; 4 – пружина возвратная; 5 – рычаг; 6 – толкатель; 7 – гайка; 8 – пружина рабочего хода; 9 – обтекатель-упор; 10 – переходник

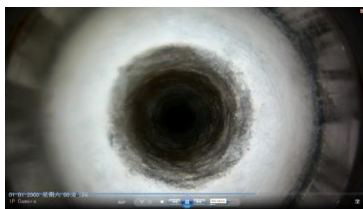


Рис. 4. Вид измерительной скважины вблизи забоя (слева), в области нарезанной щели (в середине), на удалении от щели (справа)

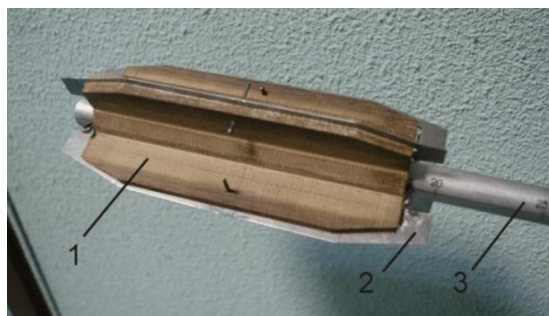


Рис. 5. Общий вид скважинного нутромера

1 – корпус; 2 – пластины выдвижные; 3 – досылочное приспособление

Корпус нутромера из текстолита представляет собой центральный стержень с четырьмя ребрами, в каждом из которых выполнены прорезы. В прорезях размещены плоские металлические пластины, которые могут смещаться в радиальных направлениях, преодолевая трение о стенки прорезей. Перед досылкой в скважину пластины устанавливаются с выступом, обеспечивающим заданный диаметр. Положение пластин после извлечения нутромера из скважины позволяет сделать заключение о ее реальном диаметре.

Испытания разработанного оборудования проводились в подземных выработках на рудниках СКРУ-1, СКРУ-2 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий».

Выводы:

1) Разработан и испытан в условиях рудников комплект бурового инструмента и устройств в составе: буровой снаряд для проходки в соляных породах измерительных скважин повышенной геометрической точности, щелеобразователь, нутромер.

2) С использованием разработанного бурового снаряда в соляном массиве отбурено 13 прямолинейных измерительных скважин диаметром $76 \pm 0,5$ мм глубиной до 10 м и общей протяженностью порядка 120 м.

3) Обеспечены требования к гладкости поверхности скважин. Отсутствие неровностей на стенках скважин, необходимое для плотного прилегания к ним пакеров, позволило выполнить более 50 тестов измерительного гидроразрыва без возникновения случаев разгерметизации межпакерного интервала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонтьев А. В., Рубцова Е. В., Леконцев Ю. М., Качальский В. Г. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 1. – С. 104–110.

2. Леконцев Ю. М., Леонтьев А. В. Устройство для создания инициирующих щелей в стенках солевых скважин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 181–184.

© Ю. М. Леконцев, Е. В. Рубцова, А. А. Скулкин, 2017

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАМЕРНО-ЦЕЛИКОВОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ТРУБКИ «БОТУОБИНСКАЯ»

Василий Дмитриевич Барышников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 116, e-mail: vbar@misdnsc.ru

Лидия Николаевна Гахова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, e-mail: gahoval@mail.ru

Выполнен анализ геомеханической ситуации при камерно-целиковой системе разработки первого этажа трубки «Ботубинская» АК «АЛРОСА», расположенного на контакте рудного тела с налегающей толщей осадочных пород. По результатам геомеханических расчетов напряженного состояния конструктивных элементов определены параметры камер и целиков с точки зрения обеспечения их устойчивости.

Ключевые слова: математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, камерно-целиковая система разработки.

GEOMECHANICAL EVALUATION OF CHAMBER-AND-PILLAR MINING PARAMETERS FOR THE UPPER SECTION OF BOTUOBINSKAYA PIPE DEPOSIT

Vasiliy D. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 116, e-mail: vbar@misdnsc.ru

Lidiya N. Gakhova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Researcher, Mechanical Rock Mass State Diagnostics Laboratory, e-mail: gahoval@mail.ru

The researchers analyze geomechanical situation in the chamber-and-pillar mining at the ore body - overlaying sedimentary rocks contact at the upper level of Botuobinskaya Pipe, AK «ALROSA». Calculated geomechanical data on the stress state of structural members are used to identify parameters of chambers and pillars in terms of their stability provision.

Key words: mathematical simulation, the stress-strain state, chamber-and-pillar mining.

Трубка «Ботубинская» АК «АЛРОСА» (Якутия) расположена в зоне сплошного развития вечномёрзлых пород и относится к числу полностью погребённых кимберлитовых тел. Мощность перекрывающих трубку мерзлых отложений песчано-алевролитовых пород достигает 80 м. Породы в мерзлом состоянии (льדיстость 1 – 5%) представляют собой монолитный средней крепости массив. В верхней части трубка имеет в поперечном срезе неправильную округло-линзовидную форму. Контакты руды с боковыми вмещающими породами - субвертикальные. Мощность руд-

ного тела в дайкообразной части, протяженностью около 140 м, составляет 20–40 м, в округлой - до 80–100 м.

В качестве варианта подземной отработки трубки предложен способ поэтажного обрушения и площадного дозированного вибровыпуска руды под покрывающими породами [1].

Для отработки запасов первого этажа, расположенного на контакте с налегающей толщей осадочных пород, предложена система слоевой выемки с камерно-целиковым порядком отработки и размещением в целиках транспортных выработок с заездами, обеспечивающих выемку руды из камер (рис. 1). Данный вариант интересен с точки зрения наибольшего объема извлечения рудной массы уже на начальном этапе освоения месторождения, а также создания компенсационного пространства значительных размеров для последующего погашения толщи перекрывающих пород [1]. Погашение целиков с частичным выпуском руды и магазинированием оставшейся части осуществляется после разделения покрывающих осадочных пород на крупные блоки.

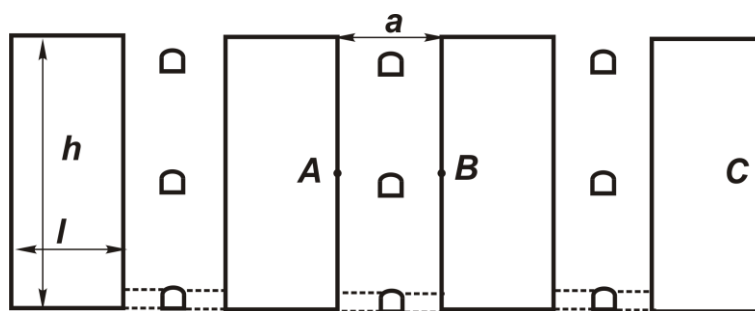


Рис. 1.

Прогноз устойчивости очистных пространств и выработок в общем случае осуществляется на основе определения предельного напряженного состояния в приконтурном массиве пород и сравнении его, в соответствии с каким-либо критерием разрушения, с прочностными свойствами горных пород (с учетом структурной нарушенности пород). Основными формами потери устойчивости очистных пространств и выработок в общем случае являются разрушения пород в зонах высоких концентраций напряжений и вывалообразование пород в зонах растягивающих напряжений.

Условия ведения горных работ в вечномерзлых породах существенно ограничивают применение известных теоретических и эмпирических решений, используемых для анализа устойчивости подземных сооружений. Наличие льдистых прослоев в массиве, обладающих ярко выраженными реологическими свойствами и снижающих его прочность, из-за отсутствия данных учитывается как влияние пластических прослоев [2, 3]. Прочностные свойства рудного и породного массивов с учетом льдистости и коэффициента структурного ослабления $k_{стр}$ приведены в табл. 1

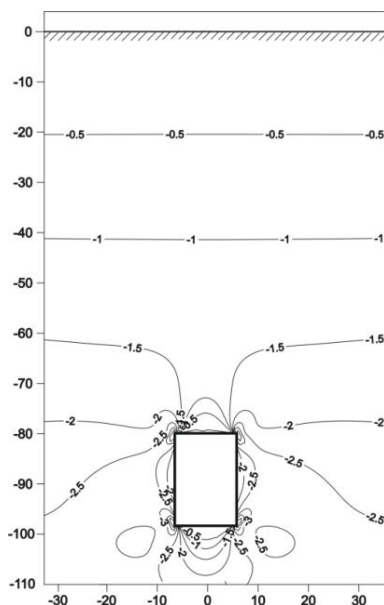
При отсутствии достоверных экспериментальных данных о параметрах естественного поля напряжений для условий вечномерзлых пород, являющихся типично выраженными реологическими геоматериалами [3], в расчетах принята гипотеза Гейма о гидростатическом распределении напряжений: $\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_x = -\lambda \gamma H$, где σ_y, σ_x - соответственно вертикальная и горизонтальная компоненты тензора напряжений, $\lambda = 1$ - коэффициент бокового распора, γ - объемный вес пород, H - глубина разработки.

Средняя прочность массива на сжатие ($\sigma_{сж}$)

Тип горной породы	Прочность на сжатие образцов керна*, МПа	Льдистость, %	Прочность массива на сжатие с учетом льдистых прослоев, МПа	$k_{стр}$	$\sigma_{сж}$, МПа
налегающие	35	10	27,4	0,3	8,2
вмещающие	25	3,5	20,5	0,3	6,2
руда	15	8,5	12,0	0,3	3,6

Краевые задачи решались в плоской постановке методом сингулярных интегральных уравнений для весомой полуплоскости. Результаты представлялись вертикальной (σ_y) и горизонтальной (σ_x) компонентами тензора напряжений.

На рис. 2 приведены графики изолиний σ_y для одиночной камеры, на рис. 2, а – зависимость σ_y в борту одиночной камеры от соотношения её линейных размеров. Уменьшение отношения высоты камеры (h) к её ширине (l) вдвое приводит к увеличению сжимающих напряжений в борту на 35 – 40%. При таком соотношении линейных размеров камеры в кровле не возникает растягивающих вертикальных напряжений. Оптимальным соотношением высоты и ширины камеры можно принять 1.5 (18 м/12 м), т.к. в этом σ_y в борту камеры незначительно изменяются при дальнейшем увеличении вертикального размера камеры (рис. 3, а) и не превышают прочности руды на одноосное сжатие.

Рис. 2. σ_y (МПа)

При отработке одиночной камеры 12×18 м на глубине 80 м в борту составляет $\sigma_y = -1,45$ МПа. При отработке двух и более первичных камер при ширине целика, равном пролёту камер, сжимающие σ_y в их бортах возрастают (рис. 4, а). Наличие камер >3 практически не сказывается на вертикальной составляющей тензора напряжений крайней камеры (рис. 4). Изменение σ_x в кровле (рис. 4, б) также незначительно с уве-

личение числа камер (> 3). При этом величины напряжений σ_x в кровле не превышают прочности на сжатие налегающих пород ($\sigma_x < 8,2$ МПа), а σ_y в бортах – прочности массива вмещающих пород ($\sigma_y < 6,2$ МПа) и рудного массива ($\sigma_y < 3,6$ МПа).

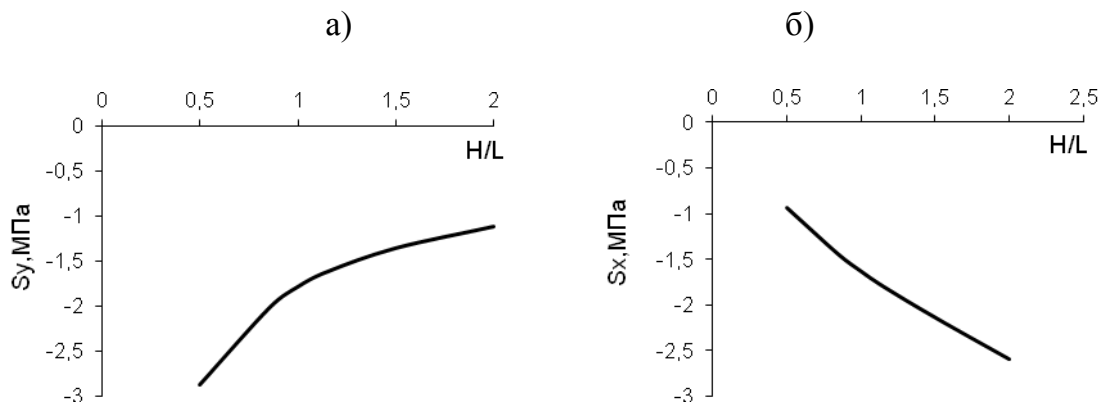


Рис. 3. Зависимости напряжений (МПа) σ_y в борту камеры (а) и σ_x в кровле (б) от соотношения линейных размеров одиночной камеры)

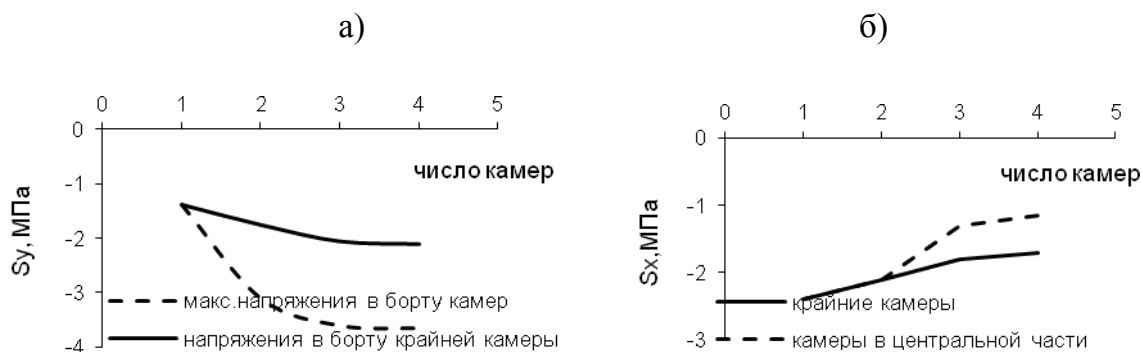


Рис. 4. Зависимость сжимающих напряжений σ_y в борту (а) и σ_x в кровле (б) от количества отработанных камер

Рассмотрим вариант камерно-целиковой системы с размещением буродоставочных выработок с рассечками для выемки руды из первичных камер. Проведение выработок приводит к ослаблению целика, снижению его несущей способности и устойчивости. Влияние этого фактора учитывается в расчете коэффициентом ослабления $k_{осл}$, отражающим уменьшение рабочей площади целика. Применительно к ленточным целикам камерно-столбовой системы разработки, ослабленной проведением штрека и рассечек, согласно [5] имеем:

$$k_{осл} = \frac{(a - l_{шт} - 0,4)(l_{пр} - l_p - 0,4)}{a \cdot l_{пр}} \quad (1)$$

где l_p - ширина рассечки, м; $l_{шт}$ - ширина транспортного штрека, м; $l_{пр}$ - расстояние между рассечками, м; a - ширина целика, м. Задавая $l_p = l_{шт} = 3$ м, $l_{пр} = 9$ м, получим: $k_{осл} = 0,62 - 2,11/a$.

Для технологически допустимых размеров целика (9÷20 м) $k_{осл}$ изменяется в интервале значений $0,38 \div 0,5$. Выполним оценку допустимых напряжений в целике

($\sigma_y^{доп}$) для различных его параметров с учетом влияющих факторов. С этой целью в формулу условия прочности целика [5] введем $k_{осл}$ и примем нормативный запас прочности $k_{зап}=1,65$. Тогда условие прочности целика можно представить в виде:

$$\frac{k_n \cdot \gamma \cdot H(a+l)}{a} \leq \sigma_y^{доп} = \frac{\sigma_{сж} \cdot k_{осл} \cdot k_{ср}}{k_{зап}}, \quad (2)$$

где, согласно [5], для $0,25 \leq a/h \leq 1$: $k_{ср} = 0,6+0,4a/h$ (сухое трение и полное сцепление на контакте целика с боковыми породами); для $1 \leq a/h \leq 4$ и развитой трещиноватости в рудном массиве ($k_{стр}<0,4$): $k_{ср} = a/h$; k_n – коэффициент нагрузки: при наличии слабых и пластичных прослоек (льдиности) в целике $k_n = 0,8$.

На основе результатов геомеханического анализа соотношений высоты и ширины камер ($h/l=1,5$), примем для прогнозных оценок ширину камеры $l = 8$ м. Тогда вертикальное напряжение, возникающее в целике, определяется формулой [5]:

$$\sigma_y^u = \frac{k_n \gamma H(a+l)}{a} = \frac{0,8 \cdot 1,7(a+l)}{a} = 1,36(1 + \frac{l}{a}) \quad (3)$$

В табл. 2 приведены величины допустимых напряжений в целике при различной его ширине (a) с учетом влияющих факторов (при $h_{min}=12$ м и $l=8$ м).

Таблица 2

Ширина целика (a), м	$k_{ср}^u = a / h$	$k_{осл}$	$\sigma_y^{доп}$, МПа	σ_y^u , МПа
12	1,00	0,44	0,96	2,27
15	1,25	0,48	1,31	2,09
18	1,50	0,50	1,64	1,96
20	1,70	0,52	1,92	1,90

Таким образом, по результатам численных расчетов и методических указаний по определению размеров камер и целиков установлены допустимые соотношения их параметров при размещении буро-доставочных выработок в целиках $a/h \geq 1,7$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин В.И., Филатов А.П. Подземная разработка алмазоносных месторождений Якутии. – Новосибирск: Изд-во «Наука», - 2008. – С. 337.
2. Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Оценка и прогноз состояния породного массива при длительной консервации геологоразведочных выработок // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2015. – С.199 - 204.
3. Казеев А.А., Изаксон В.Ю., Звонарев Н.К.. Термо- и геомеханика алмазных месторождений. – Новосибирск.: Наука.-1995.
4. Барышников В.Д., Гахова Л.Н. К оценке геомеханических условий разработки кимберлитовой трубки //ФТПРПИ. – 2001.- №5.
5. Методические указания по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов / Министерство цвет. мет. СССР, ЧФ.– Чита.- 1988.-С.126

© В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова, 2017

МОНИТОРИНГ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Антон Витальевич Азаров

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

Александр Викторович Яблоков

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, e-mail: sasha.yablokov@mail.ru

В работе рассматривается проблема мониторинга низкочастотных событий при разработке твердых полезных ископаемых. Исследуются влияние конечно-частотных явлений распространения сейсмических волн на результаты сейсмоемиссионной томографии. Для этого рассматриваются тонкослоистые модели сред. Приводятся результаты сравнения времен пробега от низкочастотных источников, рассчитанных с помощью решения уравнений упругости и уравнения эйконала. Делаются выводы о применении различных типов систем наблюдения при мониторинге низкочастотных событий в горизонтально-слоистых средах имеющие тонкие слои.

Ключевые слова: упругие волны, сейсмический источник, микросейсмический мониторинг, сейсмоемиссионная томография, времена пробега, численное моделирование.

MONITORING OF LOW-FREQUENCY MANIFESTATIONS IN HARD MINERAL MINING

Anton V. Azarov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, Junior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

Aleksander V. Yablokov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., undergraduate student, e-mail: sasha.yablokov@mail.ru

Under consideration is monitoring of low-frequency manifestations in hard mineral mining. The effect of finite-frequency phenomena in seismic wave propagation on seismo-emission tomography results is studied. Thereto, thinly laminated models of study media are considered. The comparative results are reported for transit time from low-frequency sources calculated by solving elasticity equations and eikonal equations. The authors review different-type monitoring systems designed to control low-frequency manifestations.

Key words: elastic waves, seismic source, microseismic monitoring, seismo-emission tomography, transit time, numerical modeling.

Введение. При мониторинге большой области массива горных пород используются алгоритмы микросейсмического мониторинга, получившие название эмиссионной сейсмической томографии (СЭТ) [1]. Они основаны на суммировании сейсмограмм, и дают объемную плотность интенсивности излучения во всей контролируе-

мой области породного массива и предназначены для обработки данных от множества микросейсмических событий различной интенсивности.

Для реализации алгоритмов СЭТ необходимо вычислять времена пробега от каждой точки среды до всех приемников. Часто, для решения этой задачи используют уравнение эйконала, которое является основой геометрической оптики. Применение уравнения эйконала дает высокую точность при моделировании распространения высокочастотных волн в средах с неоднородностями, характерные размеры которых много больше по сравнению с длинами волн. Когда характерные размеры неоднородностей близки к длинам сейсмических волн, данный подход может давать ошибки, поэтому использование СЭТ для мониторинга низкочастотных событий в неоднородных средах может давать неверные результаты. В этом случае, для расчета времен пробега можно использовать другой подход, основанный на решении системы уравнений упругости.

Данная работа направлена на исследование конечно-частотных явлений распространения сейсмических волн. Для этого рассматриваются тонкослоистые модели сред. Приводятся результаты сравнения времен пробега от низкочастотных источников, рассчитанных с помощью решения уравнений упругости и уравнения эйконала. Делаются выводы о применении различных типов систем наблюдения при мониторинге низкочастотных событий в горизонтально-слоистых средах имеющие тонкие слои.

Расчет времен пробега. В работе, для расчета времен пробега от каждой точки пространства до каждого приемника использовались два подхода. Первый основан на решении уравнения эйконала, которое является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных и записывается следующем виде:

$$\begin{aligned} |\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x})| &= f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega \setminus \Gamma \subset \mathbb{R}^n, \quad f(\mathbf{x}) > 0, \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Gamma \subset \Omega, \end{aligned} \quad (0)$$

где $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ – время первого прибытия волны в точку пространства $\mathbf{x}$, $f(\mathbf{x})$ – величина, обратная к полю скоростей среды, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ – начальное значение $\mathbf{u}(\mathbf{x})$. Для решения этого уравнения использовалась схема, предложенная в работе [2].

Второй подход заключается в расчете времени пробега сейсмических волн на основе решения системы уравнений упругости:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma} &= \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} + [(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{u}$ – скорости смещения среды, $\boldsymbol{\sigma}$ – напряжения.

В рамках данной работы рассматриваются трехмерные горизонтально-слоистые модели сред, поэтому решение системы (2) проводилось с использованием методики «wave number integration» [3, 4]. При использовании данной методики считается, что каждый слой является однородным и изотропным. Введение цилиндрической системы $\{z, r, \theta\}$ координат и рассмотрение сейсмических источников распределенных на оси цилиндра, позволяет понизить размерность задачи, так как решение в таком случае становится независимо от координаты θ , что приводит к снижению вычислительных затрат и повышению скорости расчета синтетических сейсмограмм. Решение в каждом слое представляется в виде суперпозиции поля генерируемого источником внутри слоя при отсутствии границ и неизвестных полей, которые необходимы, что-

бы удовлетворить граничным условиям на поверхностях раздела сред. В каждом слое решается задача упругости, решение которой можно выразить в терминах скалярных потенциалов ϕ , Λ , ψ удовлетворяющие волновым уравнениям:

$$\begin{aligned}(\nabla^2 + h^2)\phi &= 0, \\ (\nabla^2 + h^2)(\Lambda, \psi) &= 0,\end{aligned}\tag{3}$$

где h и k волновые числа для продольных и поперечных волн соответственно. Скалярный потенциал ϕ характеризует поле продольных волн, скалярные потенциалы Λ и ψ характеризуют поле поперечных волн. Альтернативным способом решения системы (2) является метод конечных разностей, который хорошо подходит для моделирования сейсмических волн в неоднородных сложно построенных средах [5, 6]. Этот метод позволяет проводить достаточно точное моделирование в широком частотном диапазоне, универсален и прост в реализации, но для трехмерных сред требует больших вычислительных мощностей.

Сравнение времен пробега. Для исследования конечно-частотных эффектов рассматривались горизонтально слоистые модели сред, имеющие тонкие слои, то есть слои, мощность которых много меньше длины волны. В качестве примера рассматривалась модель среды, содержащая высокоскоростной слой мощностью 10 метров (табл. 1). Источник располагался на глубине 700 метров.

Таблица 1

Скоростная модель среды

Номер слоя	Мощность (м)	Vp (м/с)	Vs (м/с)	ρ (кг/м ³)
1	650	2000	1200	1700
2	10	3000	1800	2200
3	600	2000	1200	1700

На первом этапе времена пробега рассчитывались на основе решения уравнения эйконала. На втором этапе времена пробега рассчитывались на основе решения системы уравнений упругости. В этом случае для моделирования использовался низкочастотный импульсный источник с частотой 15 Гц. Далее вычислялась разница между временами пробега, которые были рассчитаны различными способами.

На рис. 1 приведен график разницы времен пробега рассчитанных на основе решения уравнения упругости и уравнения эйконала. Разница вычислялась на вертикальной прямой в 450 метрах от источника.

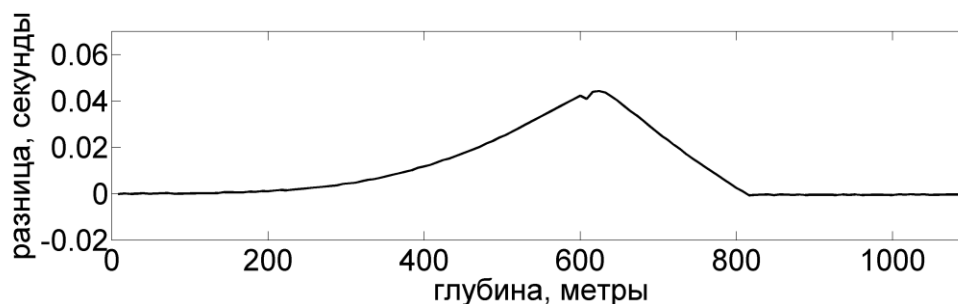


Рис. 1. Разница между временами пробега рассчитанных различными способами на прямой, расположенной в 450 метрах от источника

Как видно из рис. 1, уравнение эйконала предсказывает более раннее первое вступление сейсмических волн в области, содержащей высокоскоростной слой номер 2 (табл. 1), причем внутри слоя первое вступление регистрируется на 0.045 секунды раньше. При удалении от слоя, его влияние уменьшается. На расстояние нескольких длин волн, разница становится близкой к нулю. На рис. 2 показана разница времен пробега на прямой расположенной в 136 метрах от источника. На графике видны незначительные отличия между временами пробега. Таким образом, разница между временами пробега увеличивается при удалении от источника в области содержащей высокоскоростной слой.

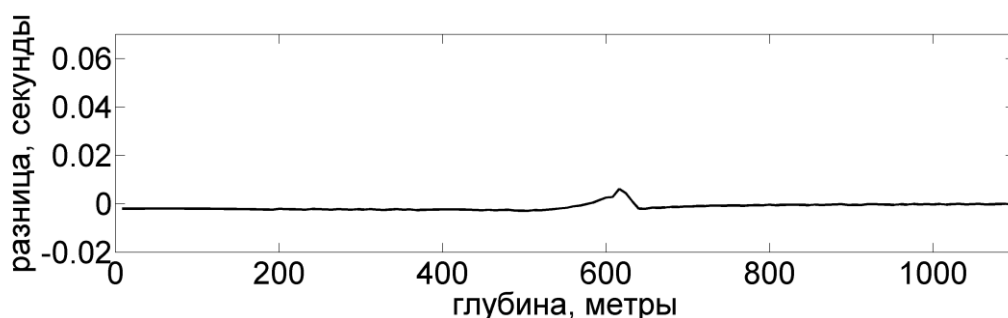


Рис. 2. Разница между временами пробега рассчитанных различными способами на прямой, расположенной в 136 метрах от источника

Выводы

При сейсмическом мониторинге низкочастотных событий, в горизонтально-слоистых средах, содержащих тонкие слои, расчет времен пробега на основе уравнения эйконала может давать ошибки. Наибольшие ошибки наблюдаются в областях содержащие тонкие слои и по мере удаление от этих областей ошибки уменьшаются. Данный эффект важно учитывать при использовании скважинных систем наблюдения пересекающие тонкие слои. В этом случае расчет времен пробега необходимо проводить на основе решения системы уравнений упругости, иначе применение методов СЭТ может давать некорректные результаты. В случае использования методов СЭТ для наземных систем наблюдения, расчёт времен пробега на основе уравнения эйконала можно проводить, если тонкие слои расположены достаточно глубоко от поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект № 16-35-00513 мол_а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хогоев Е. А., Колесников Ю. И. Применение сейсмозмиссионной томографии для изучения геодинамически активных зон // *SeismicTechnology*. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 59-65
2. Nikitin A. A., Serdyukov A. S., Duchkov A. A., Azarov A. V., Yablokov A. V. Parallel implementation of seismic traveltimes computations for 3d tomography // 15th SGEM GeoConference on Science and Technologies In Geology, Applied and Environmental Geophysics, SGEM2015 Conference Proceedings, Bulgaria, Albena, June 16–25, 2015.
3. Lucifredi I., Ishii M. A coupled wavenumber integration approach for calculating the wavefield in large-scale laterally varying structures // *Geophysical Journal International*. – 2012. – Т. 188. – №. 1. – P. 195-210.

4. Schmidt H., Glattetre J. A fast field model for three dimensional wave propagation in stratified environments based on the global matrix method // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1985. – Т. 78. – №. 6. – Р. 2105-2114
Аки К., Ричардсон П. Количественная сейсмология. Теория и методы: в 2-х томах. – М., 1983.

5. Курленя М. В., Сердюков А. С., Азаров А. В., Никитин А. А. Численное моделирование волновых полей от микросейсмических событий при подземной добыче полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2015. – №4. – С. 61-69

6. Азаров А. В., Сердюков А. С. Моделирование точечных источников микросейсмического излучения в анизотропных горных породах пластов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 9–14.

© А. В. Азаров, А. В. Яблоков, 2017

ОБ ЭНДОГЕННОЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ ПРИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ, СКЛОННЫХ К САМОВОЗГОРАНИЮ

Владимир Аркадьевич Скрицкий

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, тел. (383)205-30-30 доп. 194, e-mail: scritsky@mail.ru

Разработана модель зарождения и последующего развития очагов самонагрева угля в краевых частях угольных пластов, в которых в процессе работы по механодеструкции пласта, совершаемой силами опорного горного давления, температура угля повышается на 25-30 °C и более.

Ключевые слова: краевая часть угольного пласта, опорное горное давление, выемочный участок, проветривание, механодеструкция, температура угля, очаг самовозгорания, процесс окисления угля.

ENDOGENIC FIRE HAZARD IN HEAVY COAL-BLOCKS MINING OF GENTLY SLOPING COAL SEAMS PRONE TO SPONTANEOUS COMBUSTION

Vladimir A. Skritsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Leading Researcher, Underground Coal Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 194, e-mail: scritsky@mail.ru

The author developed the model of initiation and evolution of coal spontaneous heating centers in coal seam selvages where coal temperature tends to increase by 25-30 °C and more as the result of mechanical coal seam destruction under bearing pressure action.

Key words: coal seam selvage, bearing pressure, coal mining area, aeration, mechanical destruction, coal temperature, autoignition spot, coal oxidation.

В настоящее время высокопроизводительная отработка пологих угольных пластов, вне зависимости склонны они или не склонны к самовозгоранию, производится по схемам многоштрековой подготовки и отработки выемочных столбов, одна из наиболее часто используемых схем представлена на рис. 1 [1]. Проветривание выемочных участков производится по комбинированной схеме с прямоточным проветриванием выработанного пространства на ограниченном участке. Свежая струя воздуха для проветривания очистного забоя подается по вентиляционному штреку. При отработке лавы до 60-80% метана выделяется в выработанном пространстве. Поэтому от 20 до 30 % воздуха, поступающего к лаве, минуя очистной забой, перепускается через выработанное пространство для удаления метана из выработанного пространства в газоотводящую выработку, в качестве которой используют вентиляционный штрек подготавливаемого к отработке следующего выемочного столба.

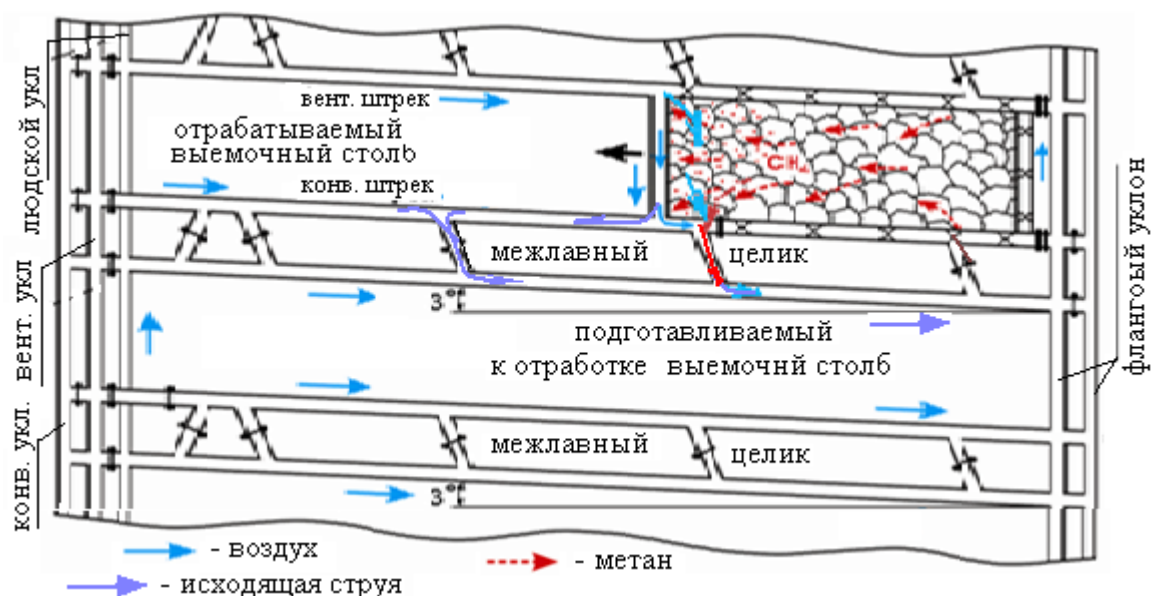


Рис. 1. Технологическая схема № 1 подготовки и отработки пологих пластов средней мощности с комбинированным способом проветривания [1].

По мере подвигания очистных забоев краевая часть пласта и межлавы целики подвергаются воздействию сил опорного горного давления (ОГД). При воздействии ОГД на краевые части пласта фактически совершается механическая работа по их деформации и разрушению с преодолением сил трения и выделением тепла. Поэтому в процессе этой работы, температура угля внутри краевой части угольного целика растет. О том, на сколько градусов повышается температура угля в межлавы целике, подвергнувшемуся воздействию ОГД, можно судить по представленным на рис. 2 результатам натурных измерений, проведенных в межлавы целике в процессе отработки лавы по пласту IV-V на шахте им. В.И. Ленина (г. Междуреченск, Кузбасс) [2].

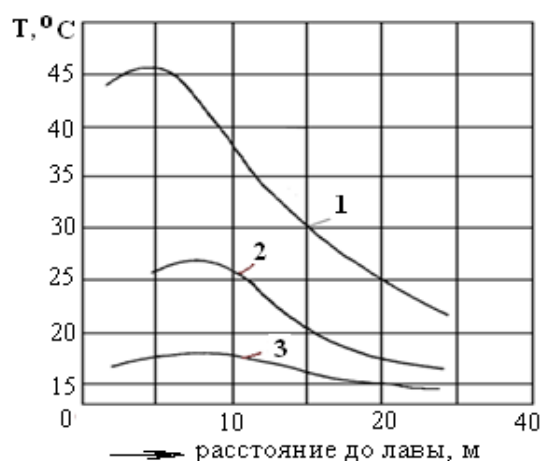


Рис. 2. Рост температуры угля внутри межлавы целика по мере нарастания ОГД, где:

1 – на глубине 5 м от борта конвейерного штрека; 2 – на глубине 4 м; 3 – на глубине 2 м

Температура угля пласта IV-V вне зоны воздействия ОГД была равна 12°C. По мере подвигания очистного забоя и нарастания ОГД температура угля в краевой ча-

сти межлавого целика неуклонно возрастала и достигла максимума, когда очистной забой приблизился к месту замеров на 5м. Температуру, достигающую 45°C, приобрел уголь, находящийся внутри целика на расстоянии 5м от борта штрека. Скачок температуры на 20°C, произошедший внутри краевой части целика на протяжении 1м – между 4м и 5м от борта штрека, указывает, что в целике, в 5м от борта штрека, при воздействии на него ОГД преобладают упругопластические деформации с преодолением сил трения.

На рис. 3 показано, где при многоштрековой схеме подготовки и отработки выемочных столбов в краевой части межлавных целиков возникают и развиваются очаги самонагрева угля.



Рис. 3. Очаги самонагрева угля, возникающие в краевой части межлавного целика на сопряжении вентсбойки с выработанным пространством действующей лавы, где:

- уголь, нагретый в процессе механодеструкции межлавного целика; — свежая струя;
- уголь, отжатый от борта штрека;
- очаг самонагрева угля;
- перепуск метана из выработанного пространства.

В местах сопряжения вентсбоек, прорезающих межлавные целики, раздавленная краевая часть угольного целика, с нагретым в ней углем, оказывается вполне проницаемой для воздуха, тем более что через вентсбойку из выработанного пространства перепускаются утечки воздуха. В результате поступления воздуха вовнутрь краевой части целика в нагретом в процессе механодеструкции и не окисленном угле развивается очаг самонагрева. По мере поступления воздуха температура угля в очаге самонагрева возрастает. Учитывая, что процесс самонагрева в подвергнувшемся механодеструкции нагретом и не окисленном угле начался не с 10-12°C, а при температуре не менее 35-45°C [2], то инкубационный период процесса окисления от стадии самонагрева до стадии самовозгорания угля сокращается не менее чем в 1,5-2 раза.

В процессе отработки выемочного столба через каждую сбойку, прорезающую межлавный целик, утечки воздуха, проветривающие выработанное пространство, перепускаются в течение ~ 1 месяца. За такой период в результате поступления воздуха к нагретому внутри краевой части пласта углю, его температура в процессе окисления возрастает, и может достигнуть высоких значений – 100°C и более.

Размеры очагов самонагрева, возникающие и развивающиеся внутри раздавленной краевой части угольного пласта (целика), обычно не превышают $0,2 \div 0,3$ м, в диаметре [3, 4]. Поэтому количество оксида углерода (СО), выделяющегося в вентсбойку из очага самонагрева, незначительно. В большом количестве воздуха (до $500 \text{ м}^3/\text{мин}$), выносящего из выработанного пространства лавы метан, концентрация СО настолько снижается, что в отбираемых пробах газа не обнаруживается. Поэтому считается, что при высокопроизводительной отработке выемочных участков, очаги самонагрева угля не возникают. Однако, после изоляции сбоек, возникшие очаги с нагретым в них углем сохраняются, хотя их развитие приостанавливается.

Но после перехода к отработке следующего выемочного столба в ранее возникшие очаги самонагрева с нагретым в них углем, вновь начинают поступать утечки воздуха, но уже из вентштрека, по которому подается свежая струя для проветривания очистного забоя. В результате поступления воздуха в эти сохранившиеся очаги самонагрева с углем, нагретым еще в процессе отработки предыдущей лавы, процесс окисления в них активизируется и может развиваться до стадии самовозгорания.

При оконтуривании выемочных столбов каждый междулавный целик прорезается несколькими вентиляционными сбоями (5-6 и более), следовательно, в районе каждой из этих сбоек, по мере отработки выемочных столбов, создаются условия для возникновения и развития очагов самонагрева угля. Однако наибольшую опасность по возникновению очагов самовозгорания угля представляют краевые части угольных целиков остроугольной формы, образующиеся, когда сбойки, прорезающие междулавные целики, проходят диагонально.

В таких целиках остроугольной формы, находящихся в краевых частях выработанного пространства наиболее часто возникают очаги эндогенных пожаров. К сожалению, даже в редких случаях, когда возникшие очаги обнаруживаются, то они обнаруживаются не в ранней стадии самонагрева угля, а в стадии его пламенного горения. Даже из не многочисленных случаев, когда в выработанном пространстве высокопроизводительных выемочных участков обнаруживались очаги самовозгорания угля, то оказывалось, что возникшие очаги приурочены преимущественно к целикам остроугольной формы, как, например: - на шахте «Колмогоровская-2» (лава № 3, пл. «Полысаевский-2»); - на шахте «Заречная» (лава № 1307, пл. «Байкаимский»); - на шахте «Антоновская» (лава № 30-33, пл. № 30).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 декабря 2011 г. N 735 "Об утверждении Технологических схем многоштрековой подготовки выемочных столбов для отработки высокогазоносных и самовозгорающихся пологих угольных пластов, обеспечивающих высокопроизводительную и безопасную работу комплексно-механизированных забоев".
2. Попов В.Б. О природе начального теплового импульса при возникновении очагов самовозгорания угля в шахтах / В.Б. Попов, В.А. Скрицкий, В. И. Храмцов, С.В. Обидов // «Безопасность труда в промышленности», М., 2002, № 3. – С. 36-38.
3. Линденау Н.И. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах [Текст] / Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылов // - М.: Недра. – 1977. – 387 с.
4. Маевская В.М. Определение оптимальных утечек воздуха на процесс самовозгорания угля при щитовой системе разработки / В.М. Маевская // В сб. научн. тр. ВостНИИ: Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра, 1961. – С. 54-62.

© В. А. Скрицкий, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА УСТАНОВКИ ШНЕКОВОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ГРУНТЕ

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией подземной строительной геотехники и геотехнологий, тел. (383)205-30-30, доп. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Борис Николаевич Смоляницкий

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, зав. отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доп. 115, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Представлены подходы к определению основных параметров системы изменения траектории рабочего органа установки для направленного шнекового бурения скважин в грунте при подземном строительстве объектов инфраструктуры и коммуникаций. Приводятся результаты экспериментальных исследований системы изменения траектории рабочего органа. Представлены значения конструктивных параметров рабочего органа с отклоняющим устройством, при которых обеспечивается криволинейная траектория скважины в выбранном направлении и достигается приемлемый для практических целей радиус кривизны.

Ключевые слова: скважина, грунт, направленное бурение, рабочий орган отклоняющее усилие, траектория, величина отклонения.

DETERMINATION OF BASIC PARAMETERS OF AN ACTIVE MEMBER DEVIATOR IN AUGER SOIL DRILLING

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head of Underground Construction Geotechnology and Equipment Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Boris N. Smolyanitsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Professor, Head of Mining and Construction GeoEquipment Department, tel. (383)205-30-30, extension 115, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Approaches to determination of basic parameters of a device to adjust an active member path in auger soil drilling in underground construction of infrastructure and communication objects are set forth. The experimental evidence on the device designed to adjust the active member trajectory is reported. Design parameters of the active member equipped with a deviating device to provide a curvilinear hole path at a wanted direction are presented. The resultant hole path is of curvature radius, admissible for practical applications.

Key words: hole, soil, directed drilling, active member, deviating or steering effort, path, deviation.

Наиболее востребованными в настоящее время являются буровые технологии, в которых предусматривается возможность изменения траектории проходки скважины для попадания в нужную точку подземного пространства, как с поверхности Земли, так и из подземной выработки. Анализ возможных способов создания и передачи управляющего воздействия на рабочий орган показал, что наиболее простыми в конструктивном отношении и в достаточной мере эффективными являются способы, основанные на использовании основных рабочих усилий бурового станка – крутящего момента и осевого напорного усилия [1, 2].

В ИГД СО РАН разработано оригинальное отклоняющее устройство [3] рабочего органа буровой установки шнекового типа [4]. Оно обеспечивает изменение траектории скважины за счет смещения рабочего органа вперед относительно корпуса и обсадной трубы. При этом происходит и радиальное смещение буровой головки за счет поворота шарнирного рычага, соединяющего ее с корпусом или обсадной трубой, которые в процессе проходки скважины не вращаются, однако имеют возможность поворота на 90^0 или 180^0 в ту или иную сторону для формирования управляющих команд.

Конструкция прототипа рабочего органа с механизмом отклонения оси скважины за счет осевого смещения режущей головки показана на рис. 1. Механизм размещен внутри корпуса 1, который является продолжением обсадной трубы – кожуха. Основным несущим элементом конструкции является приводной вал 2, установленный на передней и задней подшипниковых опорах 3 и 4.

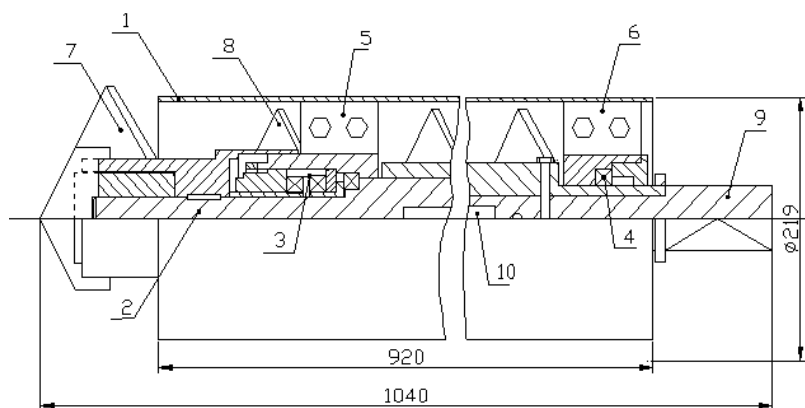


Рис. 1. Конструкция механизма изменения траектории скважины

- 1 – корпус; 2 – приводной вал; 3 – передняя подшипниковая опора;
4 – задняя подшипниковая опора; 5, 6 – соединительные элементы; 7 – буровая головка;
8 – шнековая лента; 9 – хвостовик; 10 – зонд-излучатель системы подземной локации

Конструкция соединительных элементов 5 и 6 допускает смещение оси вала 2 относительно оси корпуса 1 на величину до 10 мм в каждую сторону. При этом окружность формируемой буровой головкой скважины также смещается относительно корпуса рабочего органа и обсадной трубы. За счет этого достигается отклонение оси скважины при поступательном движении корпуса рабочего органа вперед в процессе бурения.

Для проведения экспериментальных исследований процесса взаимодействия рабочего органа направленного бурения с грунтовым массивом и установления зависи-

мости величины отклонения оси скважины от величины осевого смещения буровой головки был изготовлен прототип рабочего органа в натуральную величину для бурения скважин диаметром 230 мм.

Отклоняющее усилие создается за счет того, что при смещении оси буровой головки с одной стороны корпуса рабочего органа вырабатывается избыточное скважинное пространство, а с противоположной стороны при этом возникает невыработанная область породного массива. В процессе поступательного движения корпус рабочего органа деформирует этот невыработанный слой. Сопротивление деформированию создает отклоняющее усилие, эффективность действия которого усиливается наличием свободного пространства с противоположной стороны (рис. 2).

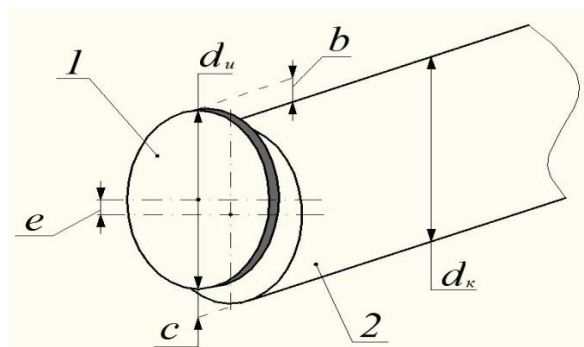


Рис. 2. Схема формирования выработанного скважинного пространства

1 – буровая головка; 2 – корпус рабочего органа; e – величина осевого смещения буровой головки; b – размер избыточно выработанного скважинного пространства; c – величина зоны недостаточного скважинного пространства

Показателем эффективности действия отклоняющего устройства является величина отклонения оси скважины на определенном отрезке ее длины. Задачей испытаний рабочего органа с отклоняющим устройством являлась проверка его работоспособности и количественная оценка величины отклонения скважины от первоначального направления.

Испытания рабочего органа с отклоняющим устройством проводились в лабораторных условиях на стенде, основным элементом которого является грунтовый канал длиной 10 м и диаметром 1020 мм.

Канал был заполнен естественной супесью без посторонних крупных включений, взятой на глубине 1,5 – 2 м и уплотненной слоями толщиной 0,15 – 0,20 м с предварительным увлажнением [5, 6].

Во всех опытах бурение скважин начиналось при горизонтальном исходном положении рабочего органа и при смещении оси буровой головки вверх. По достижении буровым инструментом примерно середины длины грунтового канала осуществлялось изменение направления отклоняющего воздействия на противоположное путем поворота обсадной трубы вокруг своей оси на 180^0 . Таким образом, производилось отклонение скважины в вертикальной плоскости вначале вверх, а затем вниз. Такое решение обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, чаще всего при сооружении скважин более жесткие требования предъявляются к точности траектории именно в вертикальной плоскости. Примером является прокладка трубопроводов для само-

течной канализационной сети. Во-вторых, отклонение в вертикальной плоскости легче измерить с необходимой точностью, поскольку линия горизонта является стабильной базой, или точкой отсчета, от которой осуществляется измерение.

Изменение величины отклоняющего усилия в различных опытах достигалось за счет варьирования значений двух конструктивных параметров – величины радиального смещения буровой головки и ее диаметра. Различное сочетание значений этих параметров определяет величины избыточно выработанного скважинного пространства с одной стороны корпуса рабочего органа и недостаточность скважинного пространства с другой его стороны. Соответственно этому изменяется величина отклоняющего усилия и результирующее смещение оси скважины. В процессе испытаний величина радиального смещения буровой головки задавалась равной 2,5 мм или 5 мм, а диаметр буровой головки имел одно из двух значений – 230 или 232 мм.

На рис. 3 представлена траектория скважины при смещении оси буровой головки, обеспечивающем максимальное избыточно выработанное скважинное пространство. Величина эксцентриситета составляла около 1% от диаметра корпуса рабочего органа. Буровая головка выходила за пределы контура окружности корпуса на величину 1,5% от его диаметра. Команда на изменение траектории подавалась при проходке скважины на длину 3 м.

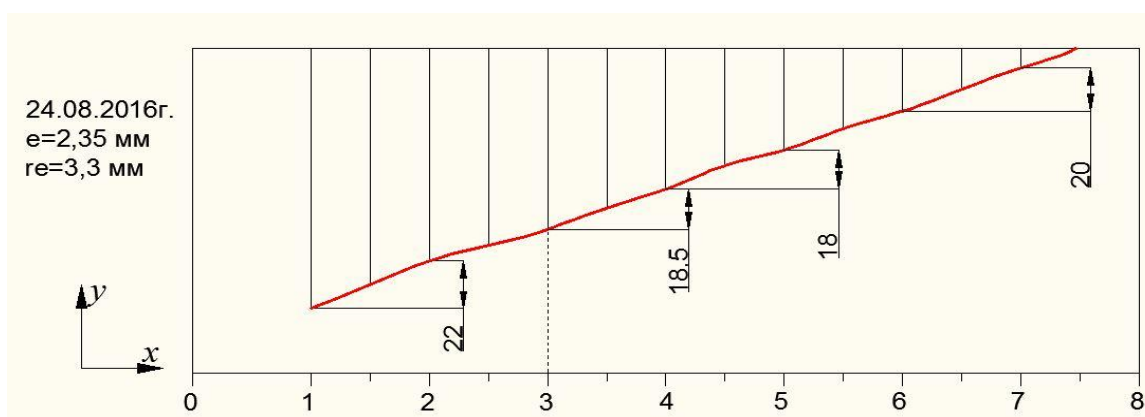


Рис. 3. Траектория скважины при максимальном избыточном выработанном скважинном пространстве и его недостаточном значении с противоположной стороны

Видно, что приведенное сочетание геометрических параметров рабочего органа не изменяет траекторию скважины, т.к. при этом не обеспечивается создание необходимой величины отклоняющего усилия вследствие малого размера зоны недостаточного скважинного пространства.

В следующей серии экспериментов значения конструктивных параметров были выбраны исходя из необходимости увеличения зоны недостаточно выработанного пространства. Это было достигнуто за счет увеличения эксцентриситета оси буровой головки и уменьшения ее диаметра. Зона недостаточно выработанного пространства увеличилась примерно в три раза по сравнению с предыдущей серией. Одновременно на ту же величину уменьшилось избыточно выработанное скважинное пространство с противоположной стороны.

Результатом этих мер явилось уменьшение отклонения скважины на первом участке, когда рабочий орган забуривался в грунт (рис. 4).

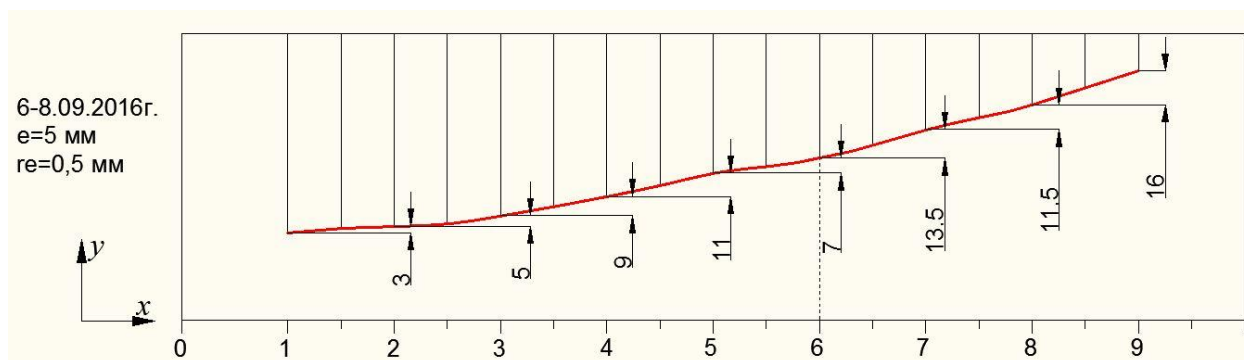


Рис. 4. Траектория скважины при уменьшении избыточного скважинного пространства и увеличении его недостаточности с противоположной стороны

В дальнейшем, при подаче команды на изменение траектории, направление скважины, также как и в первом случае, не изменялось. Следовательно, отклоняющее усилие было компенсировано стабилизирующим воздействием грунта, которое увеличилось по причине уменьшения избыточно вырабатываемого скважинного пространства.

На третьем этапе испытаний было выбрано сочетание конструктивных параметров, обеспечивающее примерно равные области недостаточного и избыточного скважинного пространства. Буровая головка имела практически одинаковый с корпусом рабочего органа диаметр (231 мм и 230 мм), а эксцентриситет $e = 5$ мм.

На первом участке, как и ожидалось, траектория скважины (рис. 5) имела дугообразную форму. После проходки скважины длиной 4 м рабочий орган был повернут на 180° в положение «движение вниз» и проходка продолжилась. На следующем после разворота участке длиной 2,5 метра происходил процесс выравнивания инструмента в горизонтальное положение, а затем рабочий орган начал перемещаться вниз по дугообразной траектории, увеличивая вертикальное смещение на каждом участке скважины. Общая длина скважины составила 10 м, вертикальное смещение на последнем участке достигло величины 15 мм/м.

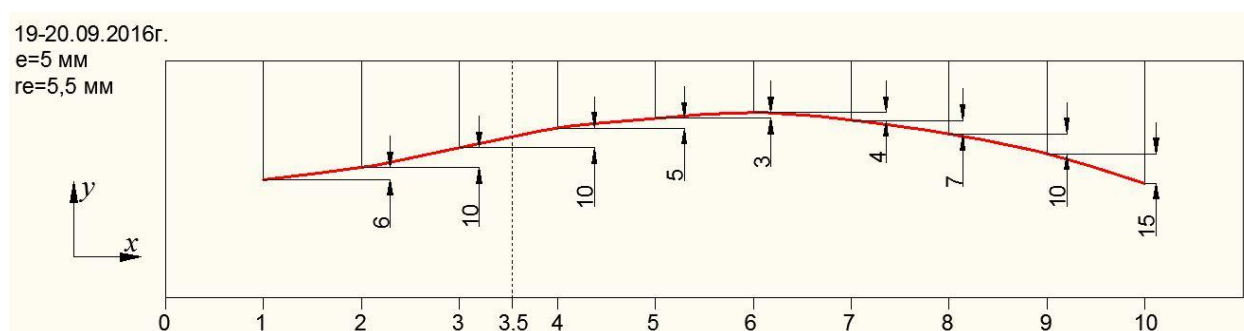


Рис. 5. Траектория скважины при равных значениях недостаточного и избыточного скважинного пространства

Таким образом, определены значения конструктивных параметров рабочего органа, при которых обеспечивается криволинейная траектория скважины в выбранном направлении.

Выводы

1. Подтверждена работоспособность предложенного принципа изменения траектории скважины за счет смещения оси вращения бурового инструмента относительно оси корпуса рабочего органа комбинацией главных движений бурового станка.
2. Наибольшая эффективность работы отклоняющего устройства достигается при симметричной форме и размерах недостаточного и избыточного скважинного пространства с противоположных сторон рабочего органа.
3. Полученная величина отклонения траектории скважины на единичном участке длины достаточна для практических целей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н. Анализ тенденций развития современных технологий сооружения скважин в породном массиве // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – № 1. – Т.2. – С. 104 –113.
2. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий // М.: Пресс Бюро № 1, 2005. –304 с.
3. Патент РФ № 147 887 Устройство для проходки криволинейных скважин в твердых грунтах// Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Фетисов С.Ю., Чещин Д.О. – БИ № 32 от 10.2. 2014 г.
4. Маметьев Л. Е. Обоснование и разработка способов горизонтального бурения и оборудования бурошнековых машин: дис. докт. техн. наук. – Кемерово, 1992. – 492 с.
5. Исаков А. Л. О классификации грунтов без жестких структурных связей по их прочностным характеристикам // ФТПРПИ – 2000. – № 6, с. 26 - 29.
6. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 24-10-84. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 19 с.

© Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, 2017

К ПРОБЛЕМЕ ВЫПУСКА СВЯЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИБРАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

Людмила Ивановна Гендлина

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)217-06-12, e-mail: gen@misd.ru

Самуил Яковлевич Левенсон

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией вибротехники, тел. (383)217-06-76, e-mail: lev@misd.ru

Представлен анализ возможностей использования вибропитателей разных конструкций для выпуска связных материалов. Предложено виброустройство с гибким рабочим органом, позволяющее обеспечить равномерное перемещение сыпучей массы с существенным сцеплением, приведена его техническая характеристика.

Ключевые слова: вибропитатель, вибровыпуск, связный материал, затухание колебаний.

VIBRATORY TECHNIQUE TO YIELD COHESIVE MATERIALS

Lyudmila I. Gendlina

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)230-05-05, extension 317, e-mail: gen@misd.ru

Samuil Ya. Levenson

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 312, e-mail: lev@misd.ru

The feasible application of different-design vibrofeeders to yield cohesive materials is analyzed. A vibration device with the flexible active member for coherent materials uniform movement is proposed. The specification of the device is provided.

Key words: vibrofeeder, vibroyield, cohesive material, vibration damping.

При переработке минерального сырья в горном и строительном производстве требуется перемещать большие объемы сыпучей массы, которая представляет собой многокомпонентные смеси геоматериалов с различными физико-механическими свойствами. Как правило, эти смеси включают глинистые составляющие, существенно увеличивающие связность материала при повышении его влажности. Технологическими линиями предусматривается временное хранение этих материалов в накопительных емкостях. Последующая выгрузка осуществляется либо гравитационным способом, либо с помощью питателей различных конструкций, среди которых широко используются вибропитатели. Их разработкой занимаются многие организации как в нашей стране, так и за рубежом. Создаваемые ими вибропитатели предназначены для перемещения сыпучих материалов, не склонных к налипанию, что и указывается в их технической характеристике. Выпуск горной массы с глинистой составляю-

щей сопровождается налипанием, а при низких температурах намерзанием материала на грузонесущей поверхности.

Принципиальное отличие вибропитателей, созданных в Институте горного дела СО РАН [1], заключается в том, что рабочий орган, имеющий малую жесткость в поперечном направлении, совершает изгибные колебания, обеспечивающие процесс выпуска. Продольные колебания рабочего органа пренебрежимо малы из-за большого трения между рабочим органом и основанием, на котором он свободно размещается. Питатели этого класса просты по конструкции, имеют малую металлоемкость, надежно работают под завалом горной массы и при отрицательных температурах. Но их существенный недостаток – значительная величина затухания колебаний от виброисточника вдоль рабочего органа, поэтому амплитуда колебаний на загрузочном участке рабочего органа может быть в десятки раз меньше, чем у вибровозбудителя, что снижает скорость перемещения материала и увеличивает время его пребывания на вибрирующей грузонесущей поверхности. Это является одной из причин уплотнения сыпучей массы на загрузочном участке питателя. Эффективность работы машины резко снижается с увеличением связности выпускаемого материала.

Для устранения отмеченного недостатка вибропитателей с упругим рабочим органом была принципиально изменена их конструктивная схема. В новой конструкции рабочий орган малой изгибной жесткости в подвешенном состоянии опирается на упругие опорные элементы, установленные по нормали к концевым участкам грузонесущей поверхности. Каждый опорный элемент одним концом жестко связан с рабочим органом, а другим – с рамой и работает на изгиб. Благодаря такой конструкции реализуются продольные колебания рабочего органа, что позволяет существенно увеличить вибрацию на загрузочном участке виброустройства.

Закономерности выпуска связных материалов вибропитателем с гибким рабочим органом, взаимосвязь его конструктивных и динамических параметров с характеристикой выпускаемого материала изучались методом физического моделирования [2,3]. В статье приведены некоторые результаты исследования.

На рис. 1 показан график распределения вдоль рабочего органа амплитуды продольной и поперечной составляющих виброскорости. Начало координат выбрано в точке приложения вынуждающей силы на расстоянии 0,5 метра от кромки разгрузочного участка рабочего органа, отсчет координат – в сторону загрузочного участка. Масса выпускаемой супеси 450 кг, ее влажность 12.5 %, измерения проводились в начальный момент выпуска, допуская несущественное изменение величины нагрузки на грузонесущей поверхности.

Из приведенных на рисунке результатов следует, что продольная составляющая вносит значительный вклад в результирующее колебание рабочего органа, вибрация загрузочного участка которого осуществляется практически только за счет этой составляющей (кривые 1б, 2б), поперечная составляющая колебаний почти полностью затухает.

Затухание колебаний является объективной причиной, оказывающей негативное влияние на скорость перемещения материала по рабочему органу. Экспериментально установлено, что при неизменных конструктивных параметрах среди факторов, влияющих на затухание колебаний по длине рабочего органа, основными являются масса и сцепление перемещаемого материала.

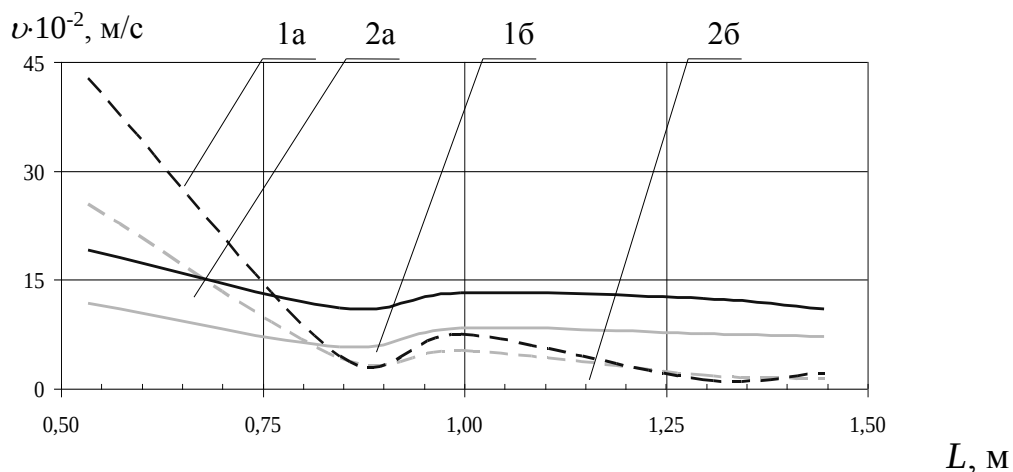


Рис. 1. Распределение амплитуды виброскорости вдоль рабочего органа:
частота колебаний: 1 – 31 Гц; 2 – 28 Гц; составляющие колебаний:
 a – поперечная; $б$ – продольная

Затухание оценивалось по безразмерной амплитуде колебаний a_{03} загрузочного участка рабочего органа, представляющей отношение амплитуд виброскорости на этом участке и на участке приложения вынуждающей силы. С увеличением массы материала на рабочем органе a_{03} сначала резко уменьшается, что связано с ростом затухания (рис. 2, кривая 1), так при увеличении массы от 150 кг (100 кг/м) до 470 кг (320 кг/м) параметр a_{03} уменьшился почти в 2 раза.

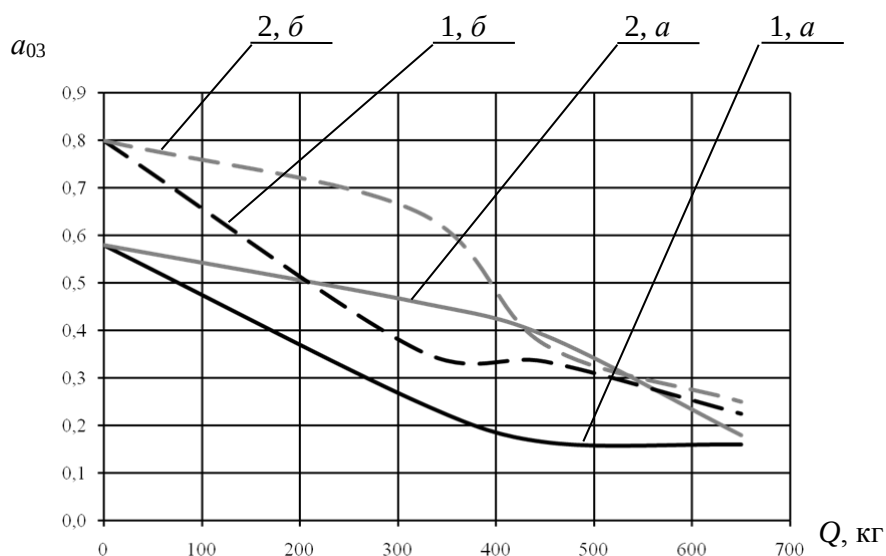


Рис. 2. Зависимость безразмерной амплитуды виброскорости загрузочного участка рабочего органа от массы выпускаемого материала: влажность материала:
1 – 12 %; 2 – 14,4 %; частота колебаний: a – 26,5 Гц; $б$ – 30 Гц

При последующем увеличении массы ее влияние постепенно слабеет и ограничивается величиной, называемой "присоединенной массой" (в рассматриваемом варианте это 950...1000 кг). Дальнейшее увеличение нагрузки на рабочий орган не оказывает заметного влияния на колебательный процесс.

Эксперименты также показали, что сцепление связного материала неоднозначно влияет на затухание колебаний. При одинаковых условиях и постоянной по величине массе материала на рабочем органе увеличение его влажности в диапазоне 9 – 12 % не вызывает заметного изменения параметра a_{03} (рис. 3). При дальнейшем росте влажности до 14 – 16 % затухание существенно уменьшается (растет безразмерная амплитуда a_{03}).

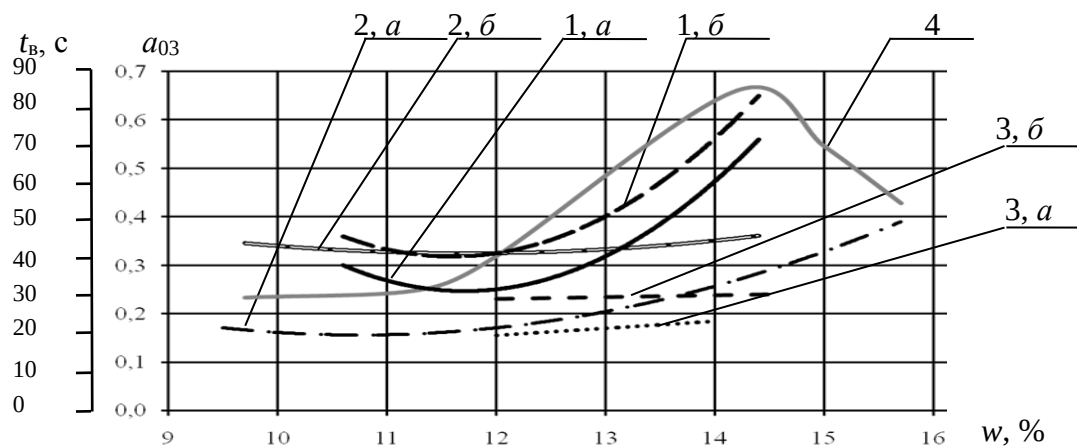


Рис. 3. Зависимость амплитуды a_{03} виброскорости загрузочного участка рабочего органа и времени $t_{\text{в}}$ выпуска связного материала от его влажности: масса материала: 1 – 320 кг, 2 – 450 кг, 3 – 650 кг; частота колебаний: а – 26,5 Гц, б – 30 Гц; 4 – время выпуска: масса материала 450 кг, частота колебаний 30 Гц

Ослабить негативное влияние затухания можно за счет увеличения продольной составляющей колебания, например, используя направленную вынуждающую силу. Установлено, что интенсивность колебаний на загрузочном участке рабочего органа существенно зависит от угла вибрации и возрастает с его уменьшением. По результатам экспериментов рекомендуется выбирать этот угол в интервале $35^{\circ} \dots 50^{\circ}$. При меньших углах вибрации и прочих равных условиях снижение амплитуды поперечных колебаний приводит к уменьшению как толщины перемещаемого слоя материала, так и скорости его движения, что в итоге замедляет процесс выпуска.

Результаты исследования процесса вибровыпуска связных материалов были использованы при создании питателя (рис. 4). Его рабочий орган 1, выполненный из стального листа толщиной 5 мм, в подвешенном состоянии размещается на раме 2 с помощью упругих элементов, закрепленных на концевых участках, что позволило реализовать продольные колебания питателя и усилить вибрацию на его загрузочном участке. Рабочий орган и рама, представляющая собой короб, образуют емкость с загрузочным и разгрузочным окнами, при этом рабочий орган является днищем этой емкости. В качестве источника колебаний используется инерционный вибровозбудитель.



Рис. 4. Экспериментальный образец вибропитателя для выпуска сыпучих материалов, в том числе связных:

1 – рабочий орган; 2 – рама

Испытания показали, что питатель способен надежно перемещать связные материалы без налипания на рабочий орган. При указанных в таблице параметрах вынуждающей силы производительность выпуска супеси с содержанием глинистой составляющей около 10 %, влажностью 13,5 % составила 55 – 60 т/ч.

Таблица

Техническая характеристика питателя

Габаритные размеры, мм:	
длина	1500
ширина	664
высота	1050
Площадь выпускного окна, м ²	0.27
Масса, кг	160
Частота колебаний, Гц	35
Вынуждающая сила, Н	2400
Мощность вибровозбудителя, Вт	950

ВЫВОДЫ

В предложенной конструктивной схеме вибропитателя реализуется режим, позволяющий снизить отрицательное влияние затухания колебаний загрузочного участка рабочего органа.

Вибропитатель, созданный на основе результатов исследований, обеспечивает равномерный выпуск материалов с существенным сцеплением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тишков А.Я., Гендлина Л.И., Еременко Ю.И., Левенсон С.Я. Вибрационное воздействие на сыпучую среду при выпуске ее из емкости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2000. – № 1. – С. 55–60
2. Гендлина Л.И., Еременко Ю.И., Куликова Е.Г., Левенсон С.Я. Совершенствование процесса вибрационного выпуска связных материалов из емкости // Горное оборудование и электромеханика.–2006. – №7. – С. 42 – 45
3. Левенсон С.Я., Гендлина Л.И., Глотова Т.Г., Алесик М.Ю., Морозов А.В. Энергосберегающие вибрационные устройства для выпуска связных материалов из емкостей на предприятиях горной промышленности // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 10. – С. 8 – 12

© Л. И. Гендлина, С. Я. Левенсон, 2017

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОПИТАТЕЛЯ

Людмила Ивановна Гендлина

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)230-05-05, доп. 317, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Евгения Григорьевна Куликова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)230-05-05, доп. 169, e-mail: shevchyk@ngs.ru

Владимир Михайлович Усольцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)230-05-05, доп. 167

Приведены результаты численного и физического моделирования динамики вибрационного питателя. Определена степень влияния конструктивных параметров упругих опорных элементов на амплитуду колебания рабочего органа. Установлено рациональное соотношение размеров упругих опорных элементов.

Ключевые слова: численная модель, физическая модель, гибкий рабочий орган, упругий опорный элемент, амплитуда колебания, соотношение параметров.

INVESTIGATION INTO THE EFFECT OF SUPPORTING ELEMENT CHARACTERISTICS ON VIBROFEEDER OSCILLATION PARAMETERS

Lyudmila I. Gendlina

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)230-05-05, extension 317, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Evgeniya G. Kulikova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Researcher, Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)230-05-05, extension 169, e-mail: shevchyk@ngs.ru

Vladimir M. Usol'tsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Researcher, Vibrotechnique Laboratory, tel. (383)230-05-05, extension 167

The data on numerical and physical simulation of the vibrating feeder dynamics are reported. The effect of structural parameters of elastic bearing elements on oscillation amplitude of active vibrofeeder member is estimated. The researchers established the rational ratio of elastic supporting element dimensions.

Key words: numerical model, physical model, flexible active member, elastic supporting element, oscillation amplitude, vibration angle, parameter ratio.

Выпуск сыпучих, в том числе связных, геоматериалов из накопительных емкостей – одна из основных операций многих технологических процессов горного производства. Для активизации перемещения материалов успешно используют питатели различных конструкций, в том числе вибрационные. Связные геоматериалы отличаются повышенными силами сцепления между частицами, что затрудняет их истечение из бункеров и повышает опасность сводо- и трубообразования. В настоящее время выпуск таких материалов остается актуальной задачей.

Для осуществления эффективного выпуска связных материалов в лаборатории вибротехники ИГД СО РАН была предложена конструкция питателя, включающая в себя рабочий орган малой изгибной жесткости, связанный с рамой посредством упругих элементов, установленных на его концевых участках с возможностью изгиба, и вибровозбудитель [1,2].

С одной стороны, за счет изгиба опорных элементов увеличивается подвижность загрузочного участка рабочего органа, и улучшаются условия выпуска связного материала. А с другой стороны, из-за провисания рабочего органа под действием перемещаемого материала происходит отклонение концов опор, связанных с рабочим органом, которое в свою очередь увеличивает провисание. Величина этого отклонения зависит от конструктивных параметров опорных элементов [2]:

$$\delta = \frac{Nl_{оп}^3}{EI}$$

где N – сила натяжения рабочего органа; $l_{оп}$ – длина опорных элементов, δ – перемещение свободного конца опоры.

Таким образом, размеры опорных элементов должны обеспечивать наибольшую интенсивность вибрации загрузочного участка и допустимое провисание рабочего органа.

Исследование влияния параметров опорных элементов на динамику вибрационного питателя и определение их рационального соотношения были выполнены методами физического и численного моделирования.

На рис. 1, а показана физическая модель питателя, рабочий орган 1 которой имеет жесткость на изгиб $189 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$ и в подвешенном состоянии закреплен на опорных элементах 3, 4, каждый из которых представлял собой плоскую пружину. Колебания рабочего органа создавались инерционным вибровозбудителем 2 с частотой колебаний 30 Гц и амплитудой вынуждающей силы 1775 Н. Модель вибропитателя была установлена в аккумуляющей емкости таким образом, что угол наклона разгрузочного участка рабочего органа к горизонту составлял $10^\circ - 15^\circ$. В качестве связного материала использовалась супесь влажностью 9 – 10 %, с содержанием глинистой составляющей около 10% и массой мерного объема 450 кг. Измерения параметров вибрации проводились в начальный момент выпуска, когда нагрузка на рабочий орган питателя максимальна. Для этого был использован измерительно-вычислительный комплекс, включающий в себя пьезоэлектрические акселерометры и усилители заряда типа 2635 (Brüel&Kjær, Дания), аналого-цифровой преобразователь Е-440 (ЗАО L-CARD, Россия) и персональный компьютер с установленным на нем «Программным комплексом автоматизации экспериментальных и технологических установок ACTest®» (ООО «Лаборатория автоматизированных систем (АС)», г.Москва). Фиксировалось также время выпуска мерного объема материала.

На рис. 1, б приведена расчетная схема вибросистемы. Были приняты следующие допущения:

– радиус кривизны транспортирующей поверхности питателя под нагрузкой значительно больше его длины;

– участок рабочего органа длиной l_1 , соответствующий площадке крепления вибровозбудителя, абсолютно жесткий, масса вибровозбудителя равномерно распределена на этом участке;

– каждый из опорных элементов представляет собой балку, которая одним концом жестко соединена с концевым участком рабочего органа, а другой – жестко заделан.

– свойства выпускаемого материала не учитываются, а его влияние на динамику вибросистемы принято как статическая сила $q(x)$, закон распределения которой по длине горизонтальной проекции рабочего органа l имеет вид:

$$q(x) = q_1(x) + q_2 = \rho dg \left(p + \frac{l-x}{l} c \right)$$

где p – высота слоя материала, находящегося выше уровня опоры загрузочного участка; d , c – ширина и высота рабочего органа соответственно; ρ – плотность выпускаемого материала; g – ускорение свободного падения.

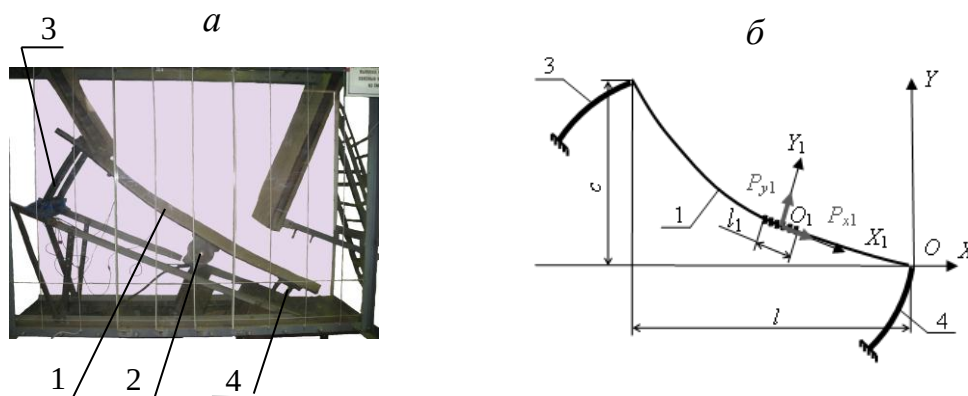


Рис. 1. Вибрационный питатель:

a – физическая модель; b – расчетная схема, принятая при формировании численной модели;
1 – рабочий орган; 2 – вибровозбудитель; 3, 4 – упругие опорные элементы

Начало координат глобальной системы XOY выбрано в точке соединения правой опоры с рабочим органом. Для удобства анализа расчетных данных была введена локальная система $X_1O_1Y_1$ с началом координат в точке приложения вынуждающей силы, которая принята сосредоточенной в центре площадки l_1 (рис. 1, б), вертикальная ось системы направлена по нормали к этой площадке, а горизонтальная – по касательной. Круговая вынуждающая сила виброисточника рассматривается в двух проекциях, изменяющихся по гармоническому закону.

Численное моделирование было выполнено методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS. Решение полной системы уравнений динамики (Full Transient Analysis) проводилось с использованием неявной схемы прямого интегрирования по времени, базирующейся на методе Ньюмарка [3].

Каждый опорный элемент в одном граничном узле был жестко связан с граничным узлом рабочего органа, а в другом – имел жесткую заделку. Узлы площадки крепления вибровозбудителя жестко связаны между собой.

Были приняты нулевые начальные условия.

В результате вычислений установлено, что амплитуда поперечных колебаний загрузочного участка рабочего органа практически не зависит от жесткости опорных элементов (рис. 2, а), что подтвердили результаты физического эксперимента.

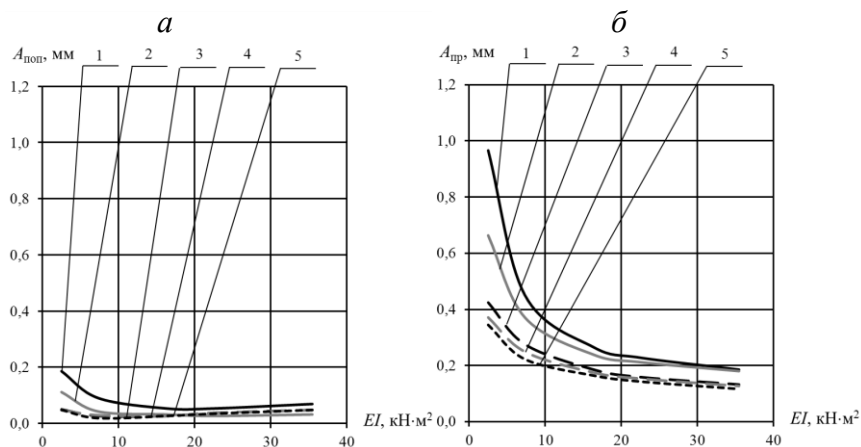


Рис. 2. Зависимость амплитуды поперечных (а) и продольных (б) колебаний рабочего органа от жесткости опорных элементов загрузочного участка:

жесткость опорных элементов разгрузочного участка: 1 – 2.5 кН·м²; 2 – 7.3 кН·м²;
3 – 16.4 кН·м²; 4 – 22.5 кН·м²; 5 – 35.5 кН·м²

Амплитуда продольных же колебаний растет с уменьшением жесткости опор, установленных как на загрузочном, так и разгрузочном участке рабочего органа (рис. 2, б). Наиболее интенсивное увеличение получено при суммарной жесткости всех используемых опорных элементов EI_{Σ} менее 40 Н·м². Однако, как показали результаты физического эксперимента, при такой жесткости опор значительно увеличивается провисание рабочего органа, уменьшается угол наклона его разгрузочного участка, и, как следствие, растет время выпуска мерного объема связного материала в 1.3 – 1.6 раза.

При равной жесткости опорных элементов загрузочного и разгрузочного участков рабочего органа изменение их длины от 0.7 до 0.32 м приводит к увеличению провисания транспортирующей поверхности питателя и уменьшению радиуса ее кривизны, что вызывает рост затухания поперечных колебаний вдоль рабочего органа и уменьшение амплитуды колебаний на его загрузочном участке (рис. 3, а). При этом амплитуда продольных колебаний увеличивается. Характер этого увеличения в значительной мере зависит от жесткости опорных элементов (рис. 3, б).

Полученные численные результаты и результаты экспериментов позволили установить, что суммарное соотношение параметров опорных элементов загрузочного и разгрузочного участков рабочего органа

$\left(\frac{l_{\text{оп}}^3}{EI} \right)_{\text{заг}} + \left(\frac{l_{\text{оп}}^3}{EI} \right)_{\text{разг}}$ не должно превышать 0.025 – 0.030 м/Н.

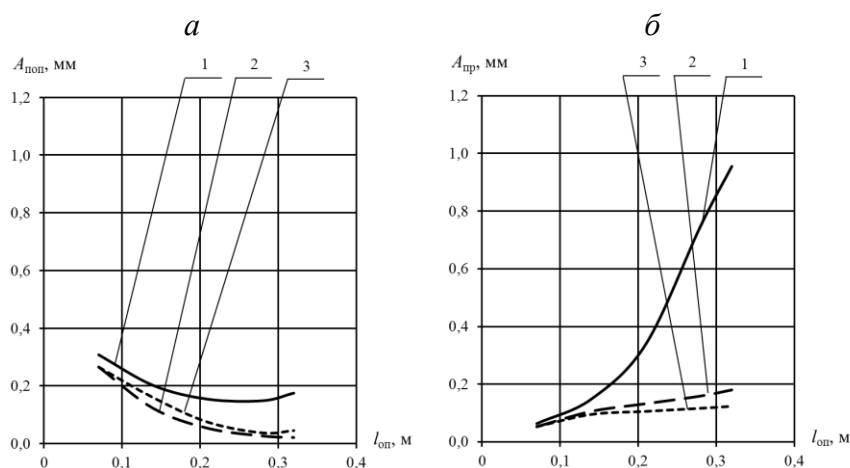


Рис. 3. Зависимость амплитуды поперечных (а) и продольных (б) колебаний рабочего органа от длины опорных элементов:

жесткость опорных элементов: 1 – 2.5 кН·м²; 2 – 16.4 кН·м²; 3 – 35.5 кН·м²

Выводы

Установлено, что конструктивные параметры опорных элементов влияют в основном на величину амплитуды продольных колебаний загрузочного участка рабочего органа.

Допустимое провисание рабочего органа может быть обеспечено, если суммарное соотношение параметров опорных элементов загрузочного и разгрузочного

участков $\left(\frac{l_{\text{оп}}^3}{EI} \right)_{\text{заг}} + \left(\frac{l_{\text{оп}}^3}{EI} \right)_{\text{разг}}$ не превышает 0.025 – 0.030 м/Н

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гендлина Л. И., Куликова Е. Г., Усольцев В. М. Обоснование расчетной схемы вибрационного питателя для выпуска связных материалов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 68–73.
2. Гендлина Л.И., Левенсон С.Я., Алесик М.Ю., Куликова Е.Г. О влиянии параметров вибрационного устройства на процесс выпуска связных материалов из емкости // Горное оборудование и электромеханика – М. – 2013 – № 1 – С. 43–46.
3. Лукашевич А.А. Современные численные методы строительной механики. – Хабаровск : Из-во Хабар. гос. техн. Ун-та, 2003 – 135 с.

© Л. И. Гендлина, Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев, 2017

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВОДОВОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОЧЕТАНИИ НАГРУЗОК

Лидия Николаевна Гахова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, e-mail: gahoval@mail.ru

По результатам численного моделирования выполнена оценка напряженного состояния турбинного сталежелезобетонного водовода гидротехнического сооружения с учетом трещинообразования бетона при различном сочетании нагрузок. Результаты расчетов, выполненных с учетом температурных воздействий, свидетельствуют об удовлетворительной сходимости расчетных значений тангенциальных напряжений в элементах водовода и результатов натурных наблюдений.

Ключевые слова: сталежелезобетонный водовод, математическое моделирование, квазистатическая термоупругость, напряженное состояние.

THE STRESS-STRAIN STATE OF MULTI-LAYERED CONCRETE WATER-SUPPLY PIPELINES UNDER COMPLEX LOADS

Lidiya N. Gakhova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Surface Mining Laboratory, e-mail: gahoval@mail.ru

Numerical simulation data are used to evaluate the stress state of a turbinal steel-concrete water-supply pipeline of a hydrotechnical structure with consideration for feasible concrete fracturing under complex loads. The results computed with consideration for temperature effects show satisfactory compliance with design values of tangential stresses in water-pipeline sections and in-situ observation evidence.

Key words: steel-concrete water-pipeline, mathematical simulation, quasi-static thermo elasticity, stress state.

Составной частью сооружений, имеющих высокий класс ответственности, являются массивные железобетонные конструкции, рассчитанные на продолжительный период эксплуатации и отвечающие требованиям надежности и безопасности. В области строительства подземных и гидротехнических сооружений к таковым относятся сталежелезобетонные водоводы. Важнейшим элементом системы оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) водоводов на всех стадиях их проектирования и эксплуатации является математическое моделирование, позволяющее учитывать многие влияющие на НДС факторы [1 – 4]. Ниже приведены результаты исследования НДС турбинного водовода Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС), вынесенного на низовую грань бетонной плотины, с учетом его конструктивных и эксплуатационных особенностей.

В настоящее время для исследований гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе турбинных водоводов, широкое применение получило конечно-элементное

моделирование [2,3], наряду с которым для исследования НДС турбинных водоводов в составе конструкций ГТС представляется перспективным использование метода граничных интегральных уравнений (МГИУ) [4]. В расчетах НДС сталежелезобетонных турбинных водоводов используются решения теории упругости и термоупругости для кусочно-однородных областей (блоков) непрямым МГИУ. Задача формулируется непосредственно для границ расчетных блоков, что не требует использования специальных приемов для отражения контактных условий (в расчетах НДС многослойного сталежелезобетонного водовода под блоками понимаются его слои [4, 5]).

Исследовалось НДС конструктивных элементов нижней части прямолинейного участка сталежелезобетонного водовода N8 СШ ГЭС (рис. 1) в условиях сезонного колебания температур воды на пороге водоприемника [4].

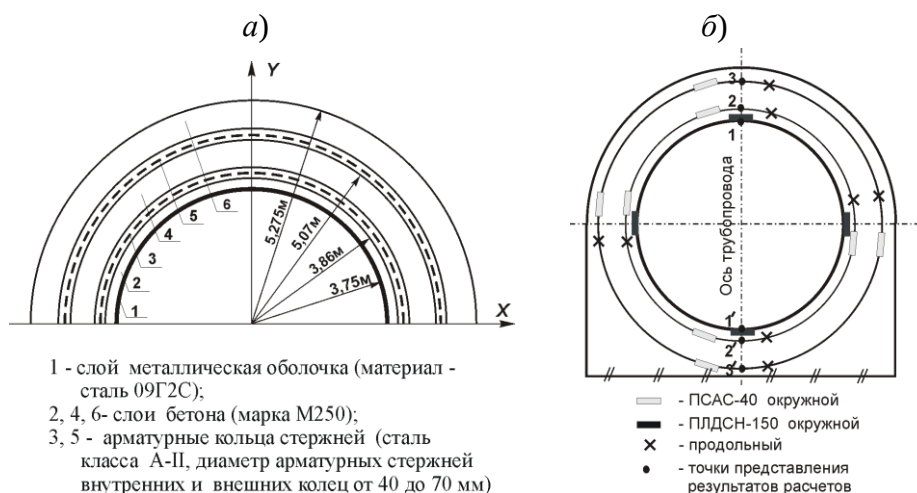


Рис. 1. а) расчетная схема водовода; б) схема сечения турбинного водовода № 8 с размещением КИА и указанием точек представления результатов расчетов

Сталежелезобетонный водовод круглого сечения моделировался в виде многослойного кольца, состоящего из внутренней стальной оболочки и внешней железобетонной оболочки с двумя слоями арматурной стали (эквивалентными двум рядам кольцевой арматуры). При этом толщина каждого из арматурных колец принималась из условия равенства площади сечения кольца площади сечения арматурных стержней в соответствующем ряду армирования. Принималось допущение, что металл оболочки, бетон и арматурные кольца – линейно деформируемые материалы. В табл. 1 приведены исходные данные для расчета напряженного состояния сталежелезобетонного турбинного водовода. Для отражения условий сопряжения тепловых потоков на границе твердого тела с текущей средой (жидкостью, воздухом) коэффициент теплоотдачи: воздуха $\beta_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; воды, движущейся по трубам: $\beta_2 = 600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; теплообмена воздух-бетон $h_1 = \beta_1 / \lambda_b = 3,45 \text{ 1/м}$; теплообмена вода – сталь $h_2 = \beta_2 / \lambda_b = 17,14 \text{ 1/м}$.

Тестирование расчетной модели выполнялось на примере турбинного водовода №8 СШ ГЭС [4,5]. В табл. 2 приведены результаты расчетов тангенциальных (σ_θ), радиальных (σ_r) напряжений (МПа) и радиальных смещений (u_r , мм) конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода, выполненные с использованием методики Гордона-Готлифа [6] и МГИУ при наибольшем подпорном уровне водохранилища

(НПУ) - 540 м с учетом трещинообразования в бетоне. Соответствующее НПУ = 540 м внутреннее давления воды в водоводе $P = 2,61$ МПа [4].

Таблица 1

Физические параметры массива	Стальная оболочка	Бетон	Материал арматурных колец
Модуль упругости, E , МПа	$2.1 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^4$	$2.1 \cdot 10^5$
Плотность, ρ , кг/м ³	7794	2400	7784
Коэффициенты:			
Пуассона ν	0,28	0.17	0.25
линейного теплового расширения α , 1/град	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$0.95 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$
теплопроводности k , Вт/(м·град)	35	1	30
температуропроводности α , м ² /сек	$7.32 \cdot 10^{-6}$	$0.54 \cdot 10^{-6}$	$0.84 \cdot 10^{-6}$
теплоотдачи α_1 , Вт/(м ² ·град)	3.51	0.87	2.1

В качестве критерия трещинообразования в бетоне принято достижение напряжениями величины σ_p предела прочности бетона на растяжение (σ_p) [4,5]. Предполагается, что до возникновения трещин бетон работает как линейно деформируемый изотропный материал с модулем упругости E_b . При достижении σ_0 предела прочности на растяжение ($\sigma_0 \geq \sigma_p$) в бетоне образуется система радиальных трещин. В тангенциальном направлении становится $E_0=0$.

Таблица 2

№ кольца	Конструктивных элемент	Внутренний радиус, см	Методика Гордона – Готлифа*			МГИУ*		
			σ_0 , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм	σ_0 , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм
1	Металлическая оболочка	375	201,99	2,61	3,6	186,2	2,26	3,9
2	Бетон	377,5	0	1,35	3,6	0	1,32	3,9
3	Арматура	386,5	194,00	1,28	3,6	142,2	1,21	3,9
4	Бетон	393,5	0	0,55	3,6	0	0,49	3,9
5	Арматура	507	147,00	0,32	3,6	102,51	0,28	3,9
6	Бетон	513	0	0,00	3,6	0	0	3,9

В эксплуатационный период НДС водоводов определяется [1,4]: гидростатическими нагрузками, носящими циклический характер, сезонными изменениями температуры наружного воздуха (T_n) и воды в водоводе (T_v), НДС низовой грани плотины, уровнем технологических напряжений, сформированных в процессе возведения сооружения, и другими факторами. Так как низовая грань плотины сжата в продольном направлении (вдоль водовода), можно считать, что металлическая оболочка и арматура водовода также сжаты в продольном направлении и не работают при действии гидростатического давления в водоводе [1,4,5]. Напряжения σ_0 в металлической оболочке и кольцевой арматуре формируются под воздействием гидростатической нагрузки и температурных сезонных изменений T_n и T_v . В расчетах напряжений учитывалось изменение уровня верхнего бьефа (УВБ) водохранилища [4].

Результаты тестирования расчетной модели по данным натурных наблюдений иллюстрируют напряжений σ_θ в металлической оболочке и внутреннем арматурном кольце водовода в нижнем сечении водовода №8 (рис. 2). В верхних точках поперечного сечения водовода (рис. 1б) температура бетона определяется изменениями T_n , сезонный размах которой – 35,2°C [3]. Вблизи сопряжения с бетонным массивом плотины минимальные температуры – в марте, апреле; максимальные – в сентябре, октябре. Их сезонный размах не превышает 17,7 °C [3].

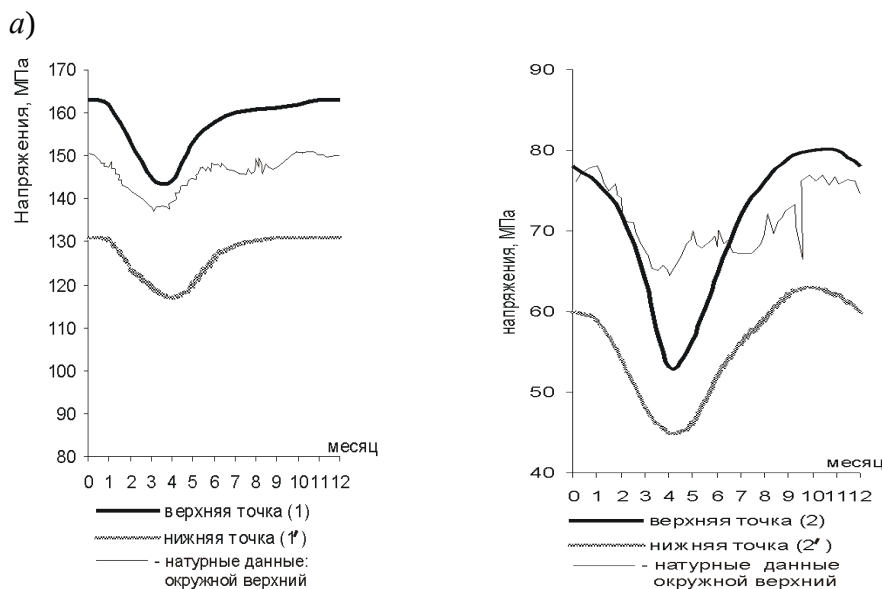


Рис. 2. Изменения кольцевых напряжений в металлической оболочке (а) и во внутреннем арматурном кольце (б) за годовой цикл в нижнем сечении водовода N8

В точках поперечного сечения элементов водовода σ_θ обусловлены их местоположением относительно жесткой заделки в низовую грань. В верхних точках поперечного сечения градиент σ_θ во всех элементах водовода значительно выше, чем в точках нижней части сечения, прилегающей к низовой грани плотины. Наибольшие приращения напряжений отмечаются во внешнем ряду арматуры: 48 МПа в верхних точках, 28 МПа в нижних. Характер σ_θ в конструктивных элементах водовода определяется гидростатической нагрузкой в водоводе: минимальные значения – в апреле, начале мая. Изменения T_n (к концу апреля среднесуточная $T_n \approx 2^\circ\text{C}$) приводит к некоторому снижению σ_θ во внешнем ряду арматуры. Дальнейшее увеличение температуры и соответствующее снижение σ_θ во внешнем ряду арматуры не компенсирует рост σ_θ от увеличения гидростатической нагрузки, вызванной наполнением водохранилища. Максимальные кольцевые напряжения в элементах водовода наблюдаются в ноябре – январе. Они обусловлены высокими отметками УВБ и низкими T_n и T_b .

Сравнение результатов численных расчетов с данными натурных наблюдений свидетельствует об их удовлетворительной сходимости по характеру

изменений σ_θ . Определенное различие величин может быть обусловлено тем, что расчеты выполнены без учета влияния НДС низовой грани плотины и технологических напряжений, сформировавшихся в процессе возведения сооружения, в частности, без учета технологического обжатия при бетонировании водовода.

Таким образом, МГИУ позволяет учесть конструктивные особенности сталежелезобетонных водоводов, гидростатические нагрузки, носящие циклический характер, сезонные изменения температуры наружного воздуха и воды в водоводе. Результаты апробации МГИУ свидетельствуют о возможности его использования в качестве расчетного аппарата для исследования НДС сталежелезобетонных турбинных водоводов высоконапорных плотин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Напряженно-деформированное состояние элементов напорного тракта турбин Саяно-Шушенской ГЭС / Л. С. Пермякова, В. А. Рассказчиков, В. А. Уляшинский, А. П. Епифанов, Ю. А. Кузнецова // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 11–18.
2. Особенности расчета и проектирования сталежелезобетонных напорных водоводов / С. Е. Лисичкин, О. Д. Рубин, Б. А. Николаев, Н. М. Камнев // «Гидротехническое строительство», - 1999, - №1, - С. 37-44.
3. Лисичкин С. Е., Рубин О. Д., Лисичкин А. С. Напряженно-деформированное состояние и армирование компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов// «Гидротехническое строительство», – 2013, – № 8, – С. 29–34.
4. Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Расчет напряжений в сталежелезобетонных турбинных водоводах методом граничных интегральных уравнений // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 8. – С. 59–65.
5. Гахова Л. Н. Кузнецова Ю. А. Напряженное состояние сталежелезобетонных турбинных водоводов в составе конструкции высоконапорной плотины // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 8. – С. 7–12.
6. Гордон Л. А., Готлиф А. А. К расчету сталежелезобетонных трубопроводов с учетом трещинообразования в бетоне // Известия ВНИИГ, т. 120, 1978 – С. 47–52.

© Л. Н. Гахова, 2017

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Владимир Иванович Востриков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией горной геофизики, тел. (383)205-30-30, доп. 117, e-mail: vvi.49@mail.ru

Никита Сергеевич Полотнянко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер лаборатории горной геофизики, тел. (383)205-30-30, доп. 314, e-mail: pbox@inbox.ru

Андрей Сергеевич Трофимов

Управление Удачинского ГОКа, 678188, Республика Саха, Мирнинский район, г. Удачный, зам. главного инженера, тел. (41136)5-34-12, e-mail: trofimovas@alrosa.ru

Андрей Анатольевич Потака

Управление Удачинского ГОКа, 678188, Республика Саха, Мирнинский район, г. Удачный, ведущий инженер, тел. (41136)5-34-12, e-mail: potakaa@alrosa.ru

В Институте горного дела СО РАН разработан и изготовлен экспериментальный вариант многоканального измерительного комплекса «Карьер – Л» для мониторинга геомеханического состояния массивов горных пород на карьерах алмазаноносных трубок. Измерительный датчик построен на принципе лазерного измерения расстояний. Передача информации осуществляется по глобальной сети Интернет. Комплекс в режиме длительного мониторинга прошел проверку работоспособности на руднике трубки «Зарница» в республике Саха. Приведены результаты мониторинга контролируемого участка «дневная поверхность – кромка борта». Анализ результатов показывает, что смещение массива на участке контроля делится на два этапа: смещение опорной точки, основного массива горных пород, которое зависит от уровня существенных дождевых осадков в осенний период года, и смещение кромки борта карьера, которое происходит при возникновении режима «замораживание – оттаивание – замораживание».

Ключевые слова: измерительный комплекс, массив горных пород, бортовой откос, геомеханическое состояние, карьер.

MEASUREMENT COMPLEX TO CONTROL GEOMECHANICAL STATE OF ROCK MASSES

Vladimir I. Vostrikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Mining Geophysics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension117, e-mail: vivo.49@mail.ru

Nikita S. Polotnyanko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Engineer, Mining Geophysics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 314, e-mail: pbox@inbox.ru

Andrey S. Trofimov

Administration of Udachninsky Mining Complex, 678188, Republic Sakha, Mirninsky raion, Udachny, Deputy Engineer-in-Chief, tel. (41136)5-34-12, e-mail: trofimovas@alrosa.ru

Andrey A. Potaka

Administration of Udachninsky Mining Complex, 678188, Republic Sakha, Mirninsky raion, Udachny, Leading Engineer, tel. (41136)5-34-12, e-mail: potakaa@alrosa.ru

A prototype of multichannel measurement complex «Kar'er-L» is developed and manufactured at Chinakal Institute of Mining, SB RAS, to monitor geomechanical state of rock masses at diamond pipe open pit mines. The measurement sensor operates on the principle of laser distance measurement with data communication through global Internet. The measurement complex was tested at the long-term monitoring mode in «Zarnitsa» Mine, Republic of Sakha. The monitoring data on the experimental «daylight surface – pit wall edge» area are reported. According to the analytical evidence the displacement of the control rock mass develops at two stages: shift of reference point in a host rock mass due to season rain precipitation in autumn and displacement of the pit wall edge provided that «“freezing-thawing-freezing mode is in progress».

Key words: measurement complex, rock mass, slope pit wall, geomechanical state, open pit mine.

Глубокие карьеры в прочных массивах горных пород, в частности, карьеры алмазаноносных трубков, характеризуются блочно-иерархическим строением горного массива. Блоки разделены трещинами и расщелинами, размер ширины которых имеет диапазон значений от десятых долей сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Система [1] состоит из центрального блока сбора информации и восьми измерительных узлов, связь между которыми осуществляется по радиоканалу. Система [2, 3] характеризуется малыми измерительными расстояниями, исчисляемыми несколькими сантиметрами. Передача информации оператору осуществляется по радиоканалу. Инструментальная система деформационного мониторинга [4] позволяет проводить измерения с большой базой, достигающей нескольких метров. Измерительные точки физически соединяются при помощи тросика, что не совсем удобно при разворачивании системы и ее перестановки. Информация накапливается в блоке памяти, что требует ее обслуживания для съема данных.

Для регистрации геомеханического состояния таких сложно-построенных массивов горных пород с точки зрения обвалоопасности в Институте горного дела СО РАН разработан экспериментальный вариант многоканального измерительного комплекса под общим названием «Карьер-МТЛ», состоящий из трех систем: «Карьер-М», «Карьер-Т» и «Карьер-Л», отличающихся типом датчика. Каждая система может работать самостоятельно, в зависимости от поставленных задач, или же объединяться с использованием общих блоков. Все системы работали на карьерах «Удачный» и «Зарница» в жестких климатических условиях Крайнего Севера.

Для контроля устойчивости участка «дневная поверхность – кромка борта» северо-восточного борта карьера «Зарница» была применена система «Карьер - Л».

1. Введение

Разработка системы «Карьер - Л» определялась задачами контроля геомеханического состояния массивов горных пород на карьере «Зарница», прилегающих к борто-

вому откосу, в частности, опасных участков в обвалоопасном отношении в районе северо-восточного разлома.

В измерительной системе “Карьер - Л” реализован лазерный принцип измерения расстояния, основанный на импульсном методе. Система работает в автономном режиме. Передача информации осуществляется по радиоканалу в пункт сбора и обработки информации в г. Удачный.

В августе 2016 г. система в составе одного датчика была развернута на опасном участке дневной поверхности северо-восточного борта отм. + 425.

На участке карьера в северо-восточном направлении на дневной поверхности на границе с бортом выделяются три широкие трещины, которыми поверхность разделена на три характерных выступа, угол которых близок к 90° . Вид участка снизу представлен на рис. 1. Задача контроля устойчивости этого участка предопределила развертывание здесь измерительной станции “Карьер - Л” в составе одного датчика. Схема установки представлена на рис. 2. Расстояние L составило 13 011,5 мм.



Рис. 1. Обвалоопасный участок бортового откоса карьера «Зарница»

Лазерный датчик системы регистрирует подвижки границы “дневная поверхность – край борта” относительно основного массива горных пород, где установлен лазерный модуль. Эта точка принимается за точку отсчета.

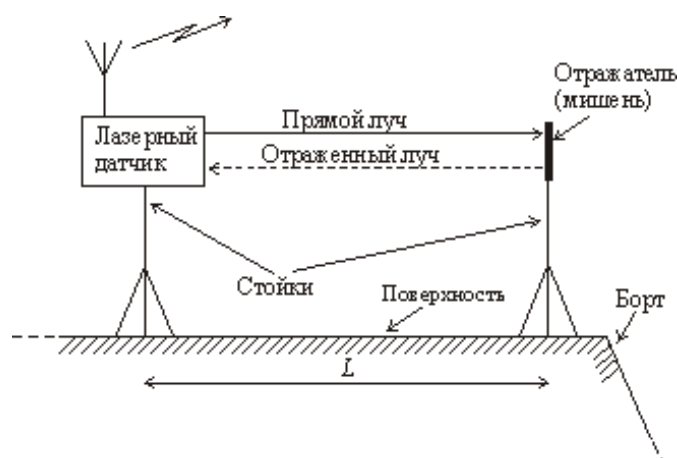


Рис. 2. Схема установки датчика

2. Описание измерительного датчика системы “Карьер - Л”.

Функциональная схема измерительного датчика представлена на рис.3.

Основу датчика составляет лазерный измеритель расстояния LEICA DISTRO 0110, для управления которым разработан модуль управления. Для исключения погрешности от температуры воздуха в лазерный датчик встроен датчик температуры. Период съема информации – 30 мин.



Рис. 3. Общая функциональная схема датчика

На фотографиях рис. 4 представлены отдельные компоненты установленной системы.

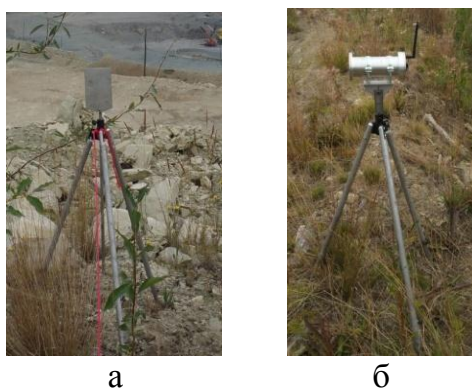


Рис. 4. Компоненты установленного датчика:

а) мишень (отражатель); б) лазерный модуль

На рис. 5 приведен график показаний датчика за период 24.08.2016 по 5.10.2016. По оси ординат приведено не абсолютное значение расстояния, а его изменение. За этот период изменение расстояния составило 6,7 мм. При этом изменение температуры составило от 9°C до -13°C.

Нисходящая ветвь графика соответствует подвижке основного массива горных пород. Восходящая ветвь соответствует подвижке кромки борта, под действием режима “замерзание - оттайка”, с последующей стабилизацией положения при замерзании.

Между карьером «Зарница» и Управлением ГОК в г. Удачный расстояние составляет около 30 км. Передача данных осуществляется при помощи GSM-связи.

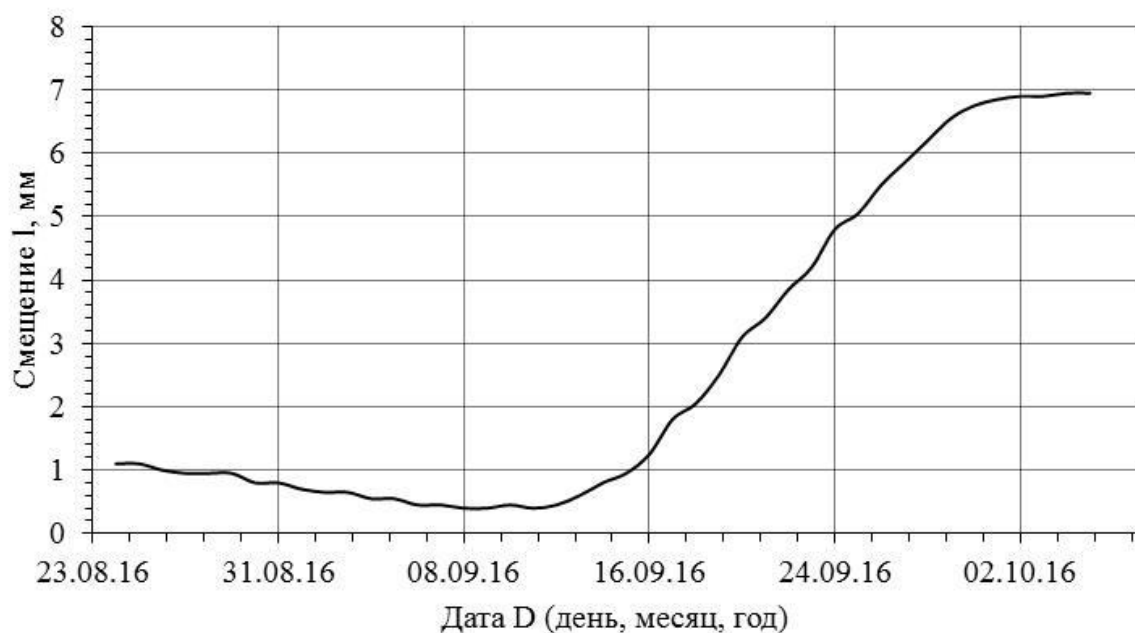


Рис. 5. График результатов измерений за период 24.08.2016 по 5.10.2016

3. Заключение.

Система “Карьер – Л” в составе одного лазерного датчика была установлена на поверхности карьера “Зарница” в конце августа 2016 г. и включена в режим длительного мониторинга. За период более чем месячной работы показал способность измерения деформаций массива горных пород и ее передачу в пункт сбора и обработки.

Результаты измерений контролируемого участка «дневная поверхность – борт» карьера на северо-восточном направлении показали, что смещения этого участка можно разделить на два этапа:

- достаточно малые смещения основного массива, 0,6 мм, определяемые повышением водонасыщенности слоя дневной поверхности от интенсивных дождевых осадков и его движение относительно границы вечной мерзлоты;
- существенные подвижки кромки борта, достигающие значений 7,5 мм, в период “замерзание – оттайка” горных пород.

Система “Карьер - Л” имеет несомненное удобство при развертывании - не надо протягивать физические линии связи между измерительными опорными точками, и передача информации осуществляется по радиоканалу.

Работа выполнена в рамках НИР проект: «Разработка методов и измерительных средств для создания комплексных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности горнодобывающих предприятий Сибири. Геомеханика и физика формирования и развития очаговых зон катастрофических событий, разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Димаки А. В., Псахье С. Г. Распределенная измерительная система для мониторинга смещений по границам раздела блочных сред на базе комплекса “Сдвиг 4МР” // ФТПРПИ. — 2009. — № 2, С. 110-117.

2. Востриков В.И., Ружич В.В., Федеряев О.В. Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // ФТПРПИ. – 2009. - № 6, С. 118-127.
3. Vostrikov V.I., Oparin V.N. Multichannel Instrumentation System for Strain and Displacement Measurements, Proceeding of the 2009 International Symposium on Mechatronic and Biomedical Engineering and Applications. Taiwan, November 5, 2009, С. 13-17.
4. Борняков С. А., Салко Д. В. Инструментальная система деформационного мониторинга и ее апробация в кимберлитовом карьере // ФТПРПИ. – 2016. - № 2, С. 172-178.

© В. И. Востриков, Н. С. Полотнянко, А. С. Трофимов, А. А. Потака, 2017

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ БУРОУГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С МОЩНЫМИ ПОЛОГОПАДАЮЩИМИ ПЛАСТАМИ

Артём Сергеевич Бобыльский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, тел. (383)205-30-30, доп. 216, e-mail a-sb@list.ru

Александр Владиславович Резник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, тел. (383)205-30-30, доп. 216, e-mail a-reznik@mail.ru

Предложена технология разработки обводненных угольных месторождений без предварительного осушения. Приведены основные параметры и преимущества технологии. Обоснована целесообразность селективной выемки вскрышных пород с крепкими включениями средствами гидромеханизации с использованием выработанного карьерного пространства для организации технологического водоема и гидроотвала.

Ключевые слова: открытые горные работы, обводненность, гидромеханизация, подводяная добыча.

PROCESS FOR MINING OF THICK FLAT-DIPPING LIGNITE BEDDED DEPOSIT

Artyom S. Bobyl'sky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Surface Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 216, e-mail a-sb@list.ru

Alexander V. Reznik

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Surface Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 216, e-mail a-reznik@mail.ru

The process for mining of wet coal deposits with no preliminary drainage is proposed. The basic parameters and advantages are pointed out with substantiation of selective extraction of overburden rocks containing hard components by applying hydromechanized machines and the use of worked out pit areas for foundation of a technological water reservoir and a hydrowaste dump.

Key words: surface mining, water content of a deposit, underwater mining.

Топливо-энергетический комплекс Сибири, обладая значительными сырьевыми ресурсами и достаточно развитой производственной инфраструктурой, был и остается главной энергетической базой России. Ведущими учеными и специалистами обоснована целесообразность увеличения в ближайшие 10-15 лет доли угля в топливно-энергетическом балансе страны до 25-30% против 15-17%, сложившейся в последние годы [1]. К 2020 году добыча угля в стране должна быть доведена до 400-430 млн. т [2]. При этом преимущественное развитие будет иметь наиболее эффективный и безопасный открытый способ добычи угля и, прежде всего, в Кузнецком и Канско-Ачинском угольных бассейнах. Это положение подтверждается и стратегией на пер-

спективу до 2035 г [3]. Проблемы открытой разработки месторождений этих бассейнов достаточно широко рассматривались многими учеными, специалистами проектных организаций и угледобывающих предприятий [4]. По итогам этих работ обоснованы и апробированы на практике основные решения по вскрытию месторождений и системам их разработки, технологии ведения горных работ и техническому оснащению горного производства.

Исходя из горно-геологических условий месторождений Канско-Ачинского угольного бассейна и физико-технических свойств слагающих их горных пород на разрезах КАТЭКа предусматривалась крупномасштабная добыча угля по поточной технологии горных работ с использованием роторных экскаваторов производительностью 5250 куб.м/час и более в комплексе с ленточными конвейерами, перегружателями и отвалообразователями [5]. Использование на ведущих разрезах бассейна (Назаровский, Бородинский, Березовский-1) высокопроизводительной техники непрерывного действия показало ее высокую эффективность, в первую очередь, на добычных работах.

Вместе с тем, в процессе эксплуатации разрезов выявлен ряд недооцененных ранее факторов, в значительной степени усложняющих ведение горных работ: наличие в основной массе слабо сцементированных вскрышных пород крепких прослоев и линз (далее крепких включений) минерализованных алевролитов, аргиллитов и песчаников на известковом, кремнистом и железистом цементе, разработка которых без предварительного разрушения роторными экскаваторами невозможна; сложные гидрогеологические условия месторождений с наличием до 3-4 водоносных горизонтов с напорными водами и ожидаемыми притоками воды в горные выработки 9000 - 12000 куб.м/час; склонность бурых углей всех месторождений бассейна к самовозгоранию.

Крепкие включения во вскрышной толще месторождений западной части КАТЭКа представлены сидеритовыми и кремнистыми разностями и, как попутно добываемое сырьё, могут быть эффективно использованы в промышленном производстве. Запасы сидеритов указанных выше месторождений оценены в размере около 5-6 млрд.т. Крепкие включения, имеющие мощность 0,1-2,5 м и занимающие 1-3% общего объема вскрышных пород, размещаются крайне неравномерно (по высоте и в плане) в 8-14 конкрециеносных горизонтах, залегающих согласно падению угольного пласта. Среднее расстояние между горизонтами составляет 7-11 м, реже 15 - 22 м. В плане крепкие включения располагаются не по всей площади месторождения, а в отдельных зонах. Размеры крепких включений в плане по отдельным горизонтам изменяются от 1 до 13 м, а расстояние между ними – от 5 до 20 м.

На месторождениях выявлено несколько водоносных горизонтов, приуроченных к вскрышным породам и угольному пласту и существенно отличающиеся гидрогеологическими условиями. Верхний и нижний водоносные горизонты вскрышной толщи приурочены соответственно к четвертичным отложениям и надугольным породам и разделены слоями алевролитов с линзами песчаников мощностью от 30 до 70 м. Наиболее мощный и выдержанный водоносный горизонт приурочен к углям пласта Итатского. Основной поток горизонта формируется в пределах карьерного поля.

Таким образом, при освоении рассматриваемых месторождений одним из определяющих факторов при выборе технологии их разработки, наряду с наличием во вскрышной толще крепких включений, является повышенная обводненность продуктивной толщи.

С учетом результатов научных исследований и опыта эксплуатации действующих разрезов бассейна (Березовский, Назаровский, Бородинский) наиболее эффективным способом осушения обводненных месторождений КАТЭКа признан подземный способ с сооружением дренажных шахт и сети подземных выработок [6]. Это обусловлено, прежде всего, низкой водопроницаемостью вскрышных пород. Коэффициент фильтрации надугольных песчаников, например, Урюпского месторождения составляет 0,55-3,66 м/сутки. Следует отметить, что подземный способ осушения является и наиболее затратным в его строительстве (до 15-20% общей сметной стоимости) и эксплуатации. Так, для осушения поля I очереди разреза «Березовский-1» была сооружена дренажная система в составе: вертикального ствола диаметром 6 м и глубиной 120 м, дренажных штреков по угольному пласту общей протяженностью 6600 м в объеме 88 тыс.куб.м., из которых пройдены горизонтальные и наклонные водоупорные скважины общей длиной более 20000 м [7]. Опыт эксплуатации этой капиталоемкой системы свидетельствует о том, что, обеспечивая удовлетворительные результаты осушения угольного пласта, она оказалась недостаточно эффективной для осушения вскрышной толщи. Это, в свою очередь, усложняет ведение горных работ и эксплуатацию горнотранспортного оборудования (налипание и намерзание пород на рабочие органы, просадка грунта под механизмами).

В поисках альтернативных решений по разработке месторождений со специфическими горно-геологическими условиями в работе приводится предлагаемая авторами технология разработки обводненных угольных месторождений с пластами большой единичной мощности без предварительного осушения продуктивной толщи, предусматривающая: селективную выемку вскрышных пород средствами гидромеханизации, угольного пласта – роторными и цепными экскаваторами; формирование в выработанном карьерном пространстве технологического водоема (с подогревом части угольного пласта) и гидроотвала вскрышных пород (рисунок).

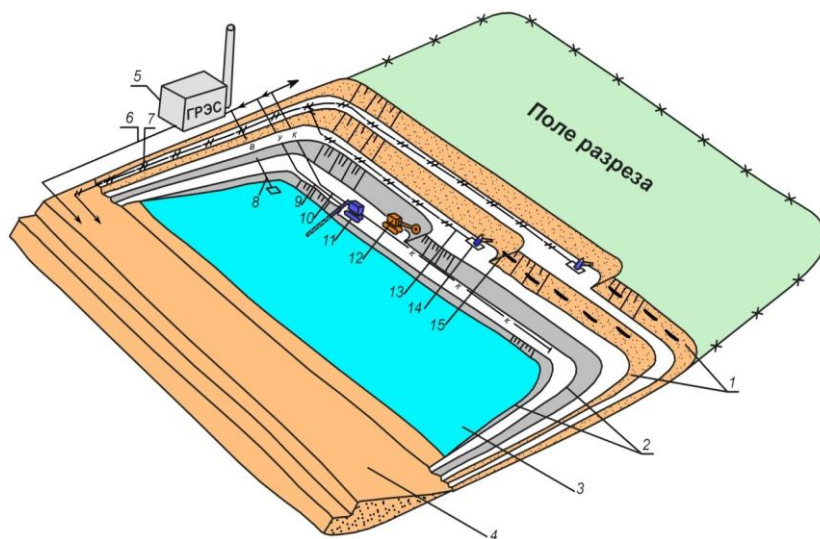


Рис. Принципиальная схема разработки Урюпского месторождения

- 1, 2 – вскрышные и добычные уступы; 3 – технологический водоем; 4 – отвал вскрышных пород; 5 – ГРЭС; 6 – шлакопровод; 7 – магистральный пульпопровод; 8 – водовод; 9 – углепровод; 10 – ленточный конвейер; 11 – цепной экскаватор; 12 – роторный экскаватор; 13 – забойный пульпопровод; 14 – гидромонитор; 15 – крепкие породные включения

Наличие технологического водоема создает благоприятные условия для применения на вскрышных породах средств гидромеханизации и размещения в выработанном карьерном пространстве породного гидроотвала. Кроме того, в случае размещения на борту разреза электростанции с угольной генерацией, как это предусматривалось программой формирования КАТЭКа [5], технологический водоем может использоваться в качестве пруда-охладителя, без сооружения аналогичного специального гидротехнического объекта с соответствующей экономией денежных средств и земельных площадей, снижением техногенной нагрузки на окружающую природную среду.

С учетом сложности разработки массива вскрышных пород с твердыми включениями техникой непрерывного действия, что выявила эксплуатация роторных экскаваторов на разрезе «Березовский-1», в данном варианте отработка вскрышных уступов предусматривается гидромеханизированным способом со складированием вскрышных пород в гидроотвале, размещаемом в выработанном пространстве разреза. Для повышения производительности и надежности технологической схемы перед гидромеханизированной выемкой вскрышных пород рассматривается вариант их предварительного рыхления экскаватором-драглайном с селективной выемкой или оконтуриванием крепких породных включений. Оработка верхнего угольного уступа предполагается по традиционной схеме роторными экскаваторами в комплексе с ленточными конвейерами, нижнего (подтопленного) – цепными экскаваторами с нижним черпанием. Выемка угля на нижнем уступе может производиться сезонно или круглогодично (с проведением, при необходимости, специальных мероприятий в зимнее время). Высота угольных уступов определяется мощностью пласта, режимом ведения горных работ, емкостью технологического водоема и параметрами выемочного оборудования.

Целесообразность применения гидромониторной разработки массива вскрышных пород на рассматриваемых месторождениях обусловлена следующими факторами: возможность селективной выемки полезных компонентов (сидеритовых включений); обеспеченность необходимыми для гидромеханизации водными ресурсами (за счет технологического водоема); использование выработанного карьерного пространства для организации гидроотвала вскрышных пород; высокая производительность и низкая себестоимость выемки вскрышных пород.

Из опыта применения гидромеханизации в различных отраслях промышленности известно, что этот способ разработки массивов горных пород обладает рядом преимуществ, среди которых – поточность выполнения технологических процессов, простота конструкций, небольшие массы и габариты используемых машин и аппаратов, высокая производительность труда, относительно небольшие капитальные и эксплуатационные затраты на производство горных работ, экологичность и безопасность производственных процессов [8]. Как показывает практика, в условиях, пригодных для применения гидромеханизации, производительность труда при гидромониторной разработке в 2-2,5 раза выше, а себестоимость в 1,5-2 раза ниже, чем при экскаваторной выемке пород и транспортировке их автомобильным транспортом.

Результаты научных исследований и большой опыт гидромеханизированной разработки массивов горных пород свидетельствуют о том, что применение этого способа на месторождениях Канско-Ачинского бассейна позволит осуществить селективную выемку основного объема вскрышных пород и крепких включений, исключив, таким образом, недостатки технологии с использованием роторных экскаваторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об основных направлениях государственной политики развития угольной отрасли и повышения конкурентоспособности ее продукции на внутреннем и внешнем рынках. Доклад государственного Совета РФ. – Уголь. – 2002. - №10.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. – Москва, 2003.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. – Москва, 2014.
4. Ческидов В.И. К вопросу использования потенциала открытой добычи угля в восточных регионах России // ФТРПИ. – 2007. - №4.
5. Разработать технологию применения комплексов машин непрерывного действия на разрезе “Урюпский-1”. Отчет по теме 1101/040000-052. УкрНИИпроект. – Киев. – 1978.
6. Техничко-экономическое обоснование строительства разреза «Урюпский» п.о. «Красноярскуголь». – Сибгирошахт, 1985.
7. Пересмотр технического проекта разреза «Березовский-1» п.о. «Красноярскуголь» (I очередь строительства разреза). – Т. ША, кН. 2. Дренаж и водоотлив. - Сибгирошахт, 1986.
8. Нурок Г.А., Ялтанец И.М. Технология гидровскрышных работ на карьерах. М. – 1975.

© А. С. Бобыльский, А. В. Резник, 2017

ПОВЫШЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Работа посвящена повышению проводимости трещин гидроразрыва, создаваемых в углепородном массиве для интенсификации предварительной дегазации угольных пластов. Для решения этой проблемы разработана химически активная рабочая жидкость гидроразрыва, которая разрушает берега создаваемых трещин. Эта жидкость закачивается в трещину в смеси с раскрепляющим материалом, плотность которого ниже плотности жидкости. Раскрепляющий материал выполнен на основе алюмосиликатных микросфер, взаимодействие которых с жидкостью гидроразрыва приводит к слипанию микросфер и образованию укрупненных раскрепляющих частиц непосредственно в трещине. Совокупность разработанных решений обеспечивает повышение проводимости трещин малообъемного шахтного гидроразрыва, закачку рабочей жидкости и раскрепляющего материала насосным оборудованием малой производительности.

Ключевые слова: углепородный массив, шахтный гидроразрыв, интенсификация дегазации угля, рабочая жидкость гидроразрыва, трещина, раскрепляющий материал, проводимость.

UPSURGE OF CONDUCTIVITY OF HYDROFRACTURES IN A COAL-ROCK MASS

Tat'yana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

The present research aims at upsurge of conductivity of hydrofractures initiated in a coal-rock mass to intensify the preliminary gas drainage from coal seams. To solve this problem the chemically active working hydrofracturing liquid is developed to destroy shores of new-made fractures. The working liquid is pumped into a fracture in the mixture with a loosening material of less density. The loosening material is based on aluminosilicate microspheres. Interaction of aluminosilicate microspheres with hydrofracturing liquid results in microsphere cohesion with formation of enlarged loosening particles directly in a hydrofracture. The totality of worked out solutions provides the improved fissure conductivity in a small-scale mine hydrofracturing with downhole pumping of the working liquid and the loosening material by small-scale pumping devices.

Key words: coal-rock mass, mine hydrofracturing, intensification of coal degasing, fracture, loosening material, conductivity.

Гидроразрыв углепородного массива при подземной разработке месторождений является одним из способов интенсификации дегазации угля и вмещающих пород. Его использование на стадии предварительной дегазации угольных пластов описано в работах [1,2] и регламентируется нормативными документами [3].

Важным фактором успешности процедуры гидроразрыва является качество жидкости разрыва. При ее выборе необходимо учитывать основные особенности, возникающие при проведении таких работ в угольных пластах:

1. Наличие обширной сети естественных трещин (первичных, вторичных и третичных), которые обеспечивают хорошую приемистость пласта во время гидроразрыва, однако, впоследствии закрываются, приводя к разрушениям пласта, потерям жидкости, образованию мелкой фракции и повышению давления обработки выше, чем это планировалось).

2. Жидкость разрыва может продавливаться далеко в пласт по системе естественных трещин без образования фильтрационных каналов.

3. Образующиеся при гидроразрыве трещины обладают сложной геометрией.

4. Образование мелкой фракции и угольной пыли.

Также необходимо учитывать специфику разработки угольных пластов для интенсификации дегазации и состав горных пород. Особенностью существующих систем разработки является близкое расположение скважин (10-25 м) и трещины гидроразрыва радиусом 5-12 м.

Для создания трещин с высокой проводимостью в углепородном массиве перспективно использование раскрепляющих материалов (проппантов). Определяющими факторами выбора жидкости гидроразрыва углепородного массива являются стоимость, эффективность переноса взвеси проппанта, способность увеличить раскрываемость трещин.

Основными характеристиками системы «жидкость разрыва–проппант» являются: реологические свойства «чистой» жидкости и жидкости, содержащей проппант; способность жидкости обеспечить перенос проппанта к концам трещины во взвешенном состоянии без его преждевременного осаждения; инфильтрационные свойства жидкости; физические свойства проппанта (прочность, размер гранул и гранулометрический состав, качество, форма гранул и плотность).

В настоящее время в качестве рабочей жидкости разрыва при вскрытии газоносных угольных пластов широко используются вода, различные виды гелей, пенные либо пенокислотные системы, азот [4, 5]. Использование воды и углекислого газа осложняется взаимодействием с метаном, что ухудшает его добычу.

Во многих скважинах США, пробуренных для добычи метана угольных пластов, при разрыве использовались полимеры, «сшитые» ионами бората, так называемые, сшитые (*crosslinked*) гели [4]. Увеличенная вязкость за счет добавления ионов бората дает одно из главных преимуществ сшитых гелей – отличная транспортировка проппанта. Необходимо отметить стабильность вязкости таких гелей при высоких температурах. Недостатками являются достаточно высокая стоимость, изменение поверхности угля химикатами, входящими в состав геля, возможная закупорка каналов течения на большой удаленности от скважины [4].

Выбор азота в качестве агента расклинивания имеет ряд преимуществ: во-первых, закачивается меньшее количество жидкости разрыва, следовательно, меньше загрязняется трещина и пласт; во-вторых, обработка скважины приводит к очистке трещины и пласта от полимера, тем самым увеличивается проводимость и эффективная длина трещины. Применение обычного локального гидроразрыва водой без раскрепления трещины проппантом ведет к неуправляемому характеру развития трещины и быстрому снижению ее проницаемости за счет плотного смыкания берегов трещины после сброса в ней давления.

Качественная характеристика жидкостей разрыва, применяемых для угольных пластов, приведена в табл. 1 [6]. В скобках дана оценка – чем она выше, тем предпочтительнее использование данной жидкости.

Таблица 1

Сравнительные характеристики жидкостей разрыва

	Изменение свойств пласта		Упаковка про- панта	Длина размещения пропанта
Вода без проп- панта	Низкая (3)	Слабое (3)	Слабая (1)	Малая (1)
Вода с пропан- том	Низкая (3)	Слабое (3)	Слабая (1)	Малая (1)
Линейный по- лимер	Допустимая(2)	Высокое (1)	Допустимая (2)	Допустимая (2)
Сшитый гель	Допустимая (2)	Высокое (1)	Высокая (4)	Высокая (4)
Азотная пена	Высокая (1)	Слабое (3)	Хорошая (3)	Хорошая (3)

Таким образом, анализ опыта проведения гидроразрыва углепородного массива позволяет выявить перспективные направления исследований с целью интенсификации предварительной дегазации угольных пластов:

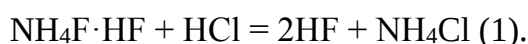
1. Разработка жидкости разрыва для увеличения проницаемости приповерхностного слоя трещины гидроразрыва.

2. Создание раскрепляющего материала для повышения остаточной проводимости трещины гидроразрыва в углепородном массиве.

Значительную интенсификацию дегазации можно достигнуть за счет увеличения проницаемости приповерхностного слоя трещин гидроразрыва, за счет частичного разрушения этого слоя и создания условий для неполного смыкания берегов трещин при их закрытии. Для этого предлагается использовать химически активную жидкость гидроразрыва в комплексе с раскрепляющим материалом с низкой плотностью.

Загрязнителями призабойной зоны углепородного массива могут быть химически устойчивые силикатные минералы (кварц, полевые шпаты, глины). Известным решением для очистки от таких загрязнений и увеличения проницаемости приповерхностного слоя трещин гидроразрыва является обработка грязевой кислотой, которая представляет собой смесь соляной и плавиковой кислот различной концентрации. Обычно эти концентрации не превышают 12% мас. для HCl и 3% мас. для HF. Однако применение грязевой кислоты осложняется токсичностью плавиковой кислоты и ее высокой коррозионной активностью.

При разработке состава для интенсификации дегазации угольных пластов методом локального разрыва был выбран подход на основе использования реагентов-кислотообразователей, при реакции (1) которых друг с другом образуется плавиковая кислота:



Одна из жидкостей – это смесь водного раствора бифторида аммония с алюмосиликатными микросферами, другая – водный раствор соляной кислоты. Использование бифторида аммония вместо плавиковой кислоты удобно и безопасно. Таким образом, состав для интенсификации дренирования пластов состоит из двух жидкостей,

нагнетаемых в интервал разрыва по отдельным рукавам высокого давления в соотношении 1:1:

- 1 - смесь водного раствора бифторида аммония и проппант;
- 2 - соляная кислота концентрацией 21,4% мас.

Он образуется при смешивании жидкостей в скважине и интервале разрыва. В процессе смешивания продуктов происходит образование плавиковой кислоты HF. Это обеспечит защиту скважинного оборудования от реакционноспособных реагентов, а также возможность регулирования химической реакции в интервале разрыва, интенсивности и времени воздействия на горные породы в зависимости от их свойств.

Жидкость закачивается в трещину в смеси с раскрепляющим материалом (проппантом), повышающим остаточную проводимость трещины гидроразрыва после закрытия. В качестве проппанта предлагается использовать алюмосиликатные микросферы (АСПМ-500) (рисунок). Их взаимодействие с жидкостью гидроразрыва приводит к слипанию микросфер и образованию укрупненных раскрепляющих частиц непосредственно в трещине. Выбор такого проппанта при локальном множественном гидроразрыве оборудованием малой производительности также обусловлен плавучестью микросфер. Это позволяет закачивать смесь жидкости и проппанта с низким темпом нагнетания через гидравлические линии относительно малого диаметра. Свойства микросфер АСПМ-500 приведены в табл. 2 [7].

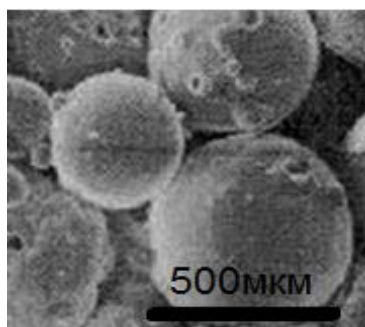


Рис. Микросферы АСПМ-500

Таблица 2

Свойства алюмосиликатных микросфер АСПМ-500

Размер, мкм	<500
Истинная плотность, кг/м ³	650-800
Коэффициент укладки	60-80% от теоретической
Насыпная плотность, кг/м ³	350-430
Предел прочности на сжатие, кг/см ²	150-280
Количество осадка, об.	<5%

Сочетание таких свойств, как сферическая форма частиц, низкая плотность, высокая механическая прочность, термостабильность и химическая инертность, делают возможным применение микросфер в качестве проппантов для локальных (маломасштабных) горнотехнологических гидроразрывов в условиях воздействия агрессивных сред и высокой температуры.

В результате проведенной работы определены основные направления исследований для повышения проводимости трещин локального шахтного гидроразрыва, применяемого для интенсификации дегазации угольных пластов. Предложена совокупность разработанных решений, обеспечивающих повышение проводимости трещин малообъемного шахтного гидроразрыва, закачку рабочей жидкости и раскрепляющего материала насосным оборудованием малой производительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №15-17-00008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mills K., Jeffrey R., Black D. et al. Developing methods for placing sand-propped hydraulic fractures for gas drainage in the Bulli Seam. // Underground Coal Operators' Conference. - Wollongong, Australia, July 7 – 8, 2006. — p. 190 – 199.
2. Курленя М. В. Пеногель для гидроразрыва газоносных угольных пластов в шахтных условиях / М.В. Курленя, Л.К. Алтунина, В. А.Кувшинов, А.В. Патутин, С.В. Сердюков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- 2012. — № 6. — С. 3 – 11.
3. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. - М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. - 250с.
4. Rudy E. Rogers. Coalbed Methane: Principles and Practices Halliburton. Coal bed methane book, 2008 / Rudy E. Rogers. - Oklahoma Publishing Co.; 3rd Edition edition, 2007. – 368p.
5. Тагиров К. М. К вопросу о гидравлическом разрыве пласта большой толщины пенокислотными системами / К. М. Тагиров, М.В. Хачатурян, Б.В. Хачатурян// Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. - 2008. - №2 (15).
6. Крейнин Е. В. Дегазации угольных пластов нужны новые технические решения! / Е.В. Крейнин// Уголь. — 2010. — № 4. — С. 45-47.
7. ТУ 5717-001-11843486-2004. Микросферы алюмосиликатные, 2004.

© Т. В. Шилова, 2017

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОСНОВНОЙ И НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ КРОВЛИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

Владимир Лазаревич Шкуратник

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник тел. (499)230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru

Петр Владимирович Николенко

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (499)230-25-93, e-mail: petrov-87@mail.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)330-56-70, e-mail: lanazarova@ngs.ru

Обоснован алгоритм определения акустического импеданса основной и непосредственной кровли выработок в углепородном массиве и расслоений между ними на основе ультразвуковых (УЗ) эхо-импульсных измерений. Последние проводятся со свободной поверхности кровли в ультразвуковом низкочастотном диапазоне частот с использованием раздельных или раздельно-совмещенных пьезоэлектрических преобразователей. Для получения искомой информации используют данные о модуле отношения амплитуд двукратно и однократно отраженных от исследуемых структурных неоднородностей УЗ импульсов, фазах их первых полувольт, а также времени и затухании импульсов в непосредственной кровле. Приведены соотношения, позволяющие оценить абсолютную погрешность определения искомого импеданса предлагаемым методом и рекомендации по выбору аппаратуры для реализации метода.

Ключевые слова: углепородный массив, горная выработка, кровля, контроль, акустический импеданс, ультразвук.

THEORETICAL BACKGROUNDS FOR ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF BASIC AND IMMEDIATE ROOF IN MINE WORKINGS IN A COAL-ROCK MASS

Vladimir L. Shkuratnik

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, D. Sc., Leading Researcher, tel. (499)230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru

Peter V. Nikolenko

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Ph. D., Researcher, tel. (499)230-25-93, e-mail: petrov-87@mail.ru

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)330-56-70, e-mail: lanazarova@ngs.ru

The authors substantiate the algorithm of acoustic impedance evaluation for basic and immediate working roof in a coal-rock mass and stratification between them on the basis of ultrasonic echo-impulse measurements. The measurements are made from free roof surface in ultrasonic low-frequency range with the use of discrete or discrete-coupled piezoelectric transducers. The data on relation module for US-impulse amplitudes, double- and singly reflected from the study structural heterogeneities, their semi-wave phases and the time of impulse duration and damping in the immediate roof are used to obtain information in question. Ratios to estimate the absolute error of the target impedance evaluation by the new-proposed method and recommendations on the apparatus to realize the new method are provided.

Key words: coal-rock mass, mine working, roof, monitoring, acoustic impedance, ultrasound.

Углепородный массив является одним из наиболее сложных объектов гео-контроля, для исследований которого привлекается широкий спектр методов горной геофизики. Важнейшей задачей, которую призваны решать эти методы, является прогноз опасных горно-геологических явлений, природа и механизмы возникновения которых во многом определяются взаимодействием существующих в массиве полей напряжений и разномасштабной структурной поврежденности. Для получения информации о параметрах указанных полей и их пространственно-временной динамике наиболее эффективны активные акустические методы, что связано, в частности, с возможностью их реализации в диапазоне частот от низкочастотной сейсмики до высокочастотного ультразвука. Это, в свою очередь, позволяет, используя различные схемы акустических измерений и алгоритмы обработки их результатов, обеспечивать высокое разрешение и дистанционность контроля геосреды в существенно изменяющихся по своим размерам областях воздействия эксперимента [1–4].

Для прогноза динамических явлений в окрестностях выработок, приводящих к потере их устойчивости важной задачей является дистанционное выявление расслоений на границе непосредственной и основной кровли, а также оценка акустического импеданса последней. При этом следует иметь ввиду, что импеданс горных пород косвенно характеризует их прочностные свойства. Ниже предлагается обоснование возможности решения этой задачи с использованием ультразвуковой эхо-локации со свободной поверхности кровли.

Сущность рассматриваемой задачи сводится к следующему. В массиве на расстоянии d_1 от обнажения расположен лоцируемый слой II с искомым импедансом Z_2 . К свободной поверхности экранирующего слоя I приложен поршневой преобразователь в виде диска радиусом a , создающий нормальное давление $\vec{P}_0$. При этом импеданс Z_1 слоя I известен.

В основе определения импеданса Z_2 лежит предварительное получение величины коэффициента отражения УЗ импульса от границы между слоями.

$$V_{12} = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (1)$$

В случае, если Z_1 определен достаточно точно, связь между относительными погрешностями в определении Z_2 и V_{12} описывается соотношением

$$\delta V_{12} = \frac{\Delta V_{12}}{V_{12}} = \frac{2Z_1 \cdot Z_2}{Z_2^2 - Z_1^2} \cdot \delta' Z_2, \quad (2)$$

где $\delta' Z_2 = \frac{\Delta Z_2}{Z_2}$.

Как следует из полученных в работе [5] результатов, относительное давление продольных волн, отразившихся произвольное число раз от плоской границы, может быть записано в виде

$$\delta P = \frac{iK_{p1}a^2}{4d_1} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n+1} \cdot V_{12}^{n+1} \cdot \exp[i2(n+1)K_{p1} \cdot d_1], \quad (3)$$

где K_{p1} – волновое число продольных волн в слое I; $(n+1)$ – число отражений от границы слоев.

Формула (3) справедлива, если вклад боковых волн, являющихся в данном случае помеховыми, достаточно мал.

Из (3) следует, что модуль отношения амплитуд двукратно и однократно отраженных УЗ импульсов равен

$$P_{21} = |\delta P_2 / \delta P_1| = |V_{21}| \cdot 2^{-1} \exp(-2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1}). \quad (4)$$

Все входящие в (4) параметры могут быть определены экспериментально: d_1 – по времени запаздывания однократно отраженных УЗ импульсов, а P_{21} – по соотношению амплитуд двукратно и однократно отраженных сигналов. Оценка затухания $\text{Im}K_{p1}$ продольной волны в слое I в силу его доступности также не представляет сложностей. Из формулы (4) следует

$$|V_{12}| = 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1}) \quad (5)$$

Знак V_{12} определяется исходя из сравнения фаз первой полуволны одно- и двукратно отраженных импульсов. Если эти фазы совпадают [5] $\text{sign}(V_{12}) < 0$ и имеет место отражение от слоя с $Z_2 < Z_1$. В противном случае $\text{sign}(V_{12}) > 0$ и $Z_2 > Z_1$. С учетом этого

$$V_{12} = \text{sign}(V_{12}) \cdot 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1}). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (1), получаем

$$Z_2 = \frac{[1 + \text{sign}(V_{12}) \cdot 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1})]Z_1}{1 - \text{sign}(V_{12}) \cdot 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1})} \quad (7)$$

Очевидно, что при наличии заполненного воздухом расслоения между основной и непосредственной кровлей $Z_2 \ll Z_1$.

Погрешность определения Z_2 в соответствии с (7) связана с погрешностью определения отношения амплитуд одно- и двукратно отраженных упругих импульсов и погрешностью в оценке затухания вследствие диссипации. Поэтому в формуле (2)

$$\Delta V_{12} = \text{sign}(V_{12}) \cdot 2(\delta A_2 - \delta A_1 + 2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1} \cdot \delta K_{p1}) \cdot P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1}), \quad (8)$$

или

$$\delta V_{12} = \delta A_2 - \delta A_1 + 2d_1 \cdot \text{Im}K_{p1} \cdot \delta K_{p1}, \quad (9)$$

где $\delta'A_1$, $\delta'A_2$, $\delta'K_{p1}$ – относительные погрешности в определении амплитуд одно- и двукратно отраженных сигналов; $\delta'K_{p1} = \Delta(\text{Im}K_{p1}) / \text{Im}K_{p1}$ – относительная погрешность в определении коэффициента затухания продольных волн в слое I соответственно.

Таким образом, из (9) и (2) получаем абсолютную погрешность определения Z_2

$$\Delta Z_2 = [(Z_2^2 - Z_1^2) / 2Z_1] \cdot [\delta'A_2 - \delta'A_1 + 2d_1 \cdot \Delta(\text{Im}K_{p1})] \quad (10)$$

Для реализации описанного способа определения импеданса экранируемой области массива может быть рекомендован УЗ прибор УД2-16, имеющий абсолютную чувствительность 100 дБ и позволяющий непосредственно получать величину отношения N амплитуд одно- и двукратно отраженных сигналов в диапазоне до 60 дБ с погрешностью не более $\pm(0,5 \div 0,03 N)$ дБ.

Основной проблемой при реализации предлагаемого алгоритма диагностики основной и непосредственной кровли является возможность получения двукратного отражения УЗ сигналов от исследуемой границы в кровле. Обеспечение такой возможности требует оптимизации параметров акустической локации искомых неоднородностей. Принципы такой оптимизации изложены в [6, 7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00029).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаров Л.А. Определение свойств структурированного породного массива акустическим методом // ФТПРПИ. – 1999. – №3. – С. 36–44.
2. Захаров В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. – 172 с.
3. Л.А. Назарова, Л.А. Назаров, М.И. Протасов. Реконструкция объемных полей напряжений в углепородном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. – 2016. – № 4. – С. 12 – 21.
4. Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Аверин А. П. Моделирование вибрационно-колебательных процессов горных пород в призабойной зоне углепородного массива при техногенном воздействии // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 28 – 32.
5. Ямщиков В. С., Данилов В. Н., Шкуратник В. Л. Особенности возбуждения и приема упругих волн в твердом слое преобразователем поршневого типа // Дефектоскопия. – 1983. – №3. – С. 16 – 23.
6. Ямщиков В.С., Данилов В.Н., Шкуратник В.Л. Принципы оптимизации акустической локации неоднородностей в массиве // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – №5. – С. 4 – 7.
7. Ямщиков В.С., Данилов В.Н., Шкуратник В.Л., Ермолин А.А. Оценка чувствительности акустической локации массива горных пород // Изв.вузов. Горный журнал. – 1985. – №1. – С. 3 – 7.

© В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко, Л. А. Назарова, 2017

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ СМЕЩЕНИЙ ГРУНТОВ БОРТА КАРЬЕРА

Владимир Федорович Юшкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной геофизики, тел. (383)205-30-30, доп. 303, e-mail: L14@ngs.ru

Представлен анализ причин формирования оползневых смещений борта карьера, обусловленных фильтрацией талых вод в осадочных грунтах и дренажом в коренных породах.

Ключевые слова: грунтовый массив борта карьера, трещиноватость коренных пород.

MECHANISM FOR PIT WALL SOIL MOTION

Vladimir F. Yushkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Principal Researcher, Mining Geophysics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 303, e-mail: L14@ngs.ru

The reasons for slides of open pit walls because of melt water infiltration in sedimentary ground and its drainage in hard rocks are analyzed.

Key words: pit wall soil mass, hard rock jointing.

Исследования разрушений и отступления линии бортов вскрышных пород в карьерах и угольных разрезах становятся актуальными с увеличением продолжительности разработки месторождений, глубин добычи полезных ископаемых и вызваны как научным интересом, так и производственной необходимостью. Систематические наблюдения и накопление фактических данных о характере и скорости развития сезонной эрозии бортов, сложенных осадочными грунтами, формируют представления о зоне бортов карьера или разреза как о природной геосистеме со специфическим комплексом прямых и обратных связей.

Эрозионные процессы в бортах карьеров и разрезов протекают довольно интенсивно, особенно в весенне-летний период, вызывая локальные разрушения и переформирование склонов, что усложняет разработку месторождений. По данным карт спутников Викимании [1], такие процессы имеют место на ряде карьеров и разрезов юга Западной Сибири. В основном это связано с рельефом местности, геологическим строением отложений, климатическими условиями региона. Процессы в грунтах, вызывающие переформирование бортов, включают ряд взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом факторов.

К таким факторам в приповерхностной части осадочных грунтов в бортах карьеров и разрезов относят эрозионные процессы, обусловленные сезонной термоденудацией, термоабразией, стоком грунтовых, дождевых и талых вод [2]. Термоденудация и эрозия – малоисследованные процессы сезонного разрушения пород и сноса продуктов при тепловом и размывающем механическом воздействии постоянных и временных водотоков, широко распространенные в бортах карьеров и разрезов юга Западной Сибири. Сложность изучения таких процессов обусловлена как труднодо-

ступностью объекта исследований, так и необходимостью организации наблюдений в зоне ведения горных работ.

На борт, подверженный термоденудации, существенно влияют такие метеорологические условия, как сезонные изменения температуры окружающей среды, промерзание грунтов, а также характер снегонакопления и дождей, зависящих от ветрового режима. Многолетний ход этих условий на юге Западной Сибири испытывает вариации, на что реагирует процесс оттаивания и эрозии, создавая условия для отседания и обрушений бортовых обнажений. Кроме того, изменение скорости термоабразии приводит к изменению ширины термотеррас, тем самым стимулируя либо замедляя процесс термоденудации.

Показатели, влияющие на развитие эрозии: относительное отседание пород при оттаивании; температура пород на глубинах нулевых колебаний (промерзания); средняя температура воздуха; коэффициенты теплоотдачи от воды к породам. Эти показатели определяются как факторы первого порядка, к которым относятся дополнительно [2, 3]: режим уровня дождевых и талых вод; режим вдоль бортового потока наносов; сопротивляемость пород размыву, зависящая от их литологии, физико-механических, теплофизических свойств (плотности, угла сдвига, коэффициента теплоотдачи), температуры, объема обвальных пород, являющегося функцией высоты борта, относительной осадки пород при сезонном оттаивании, профиля склона, извилистости линии борта.

Ко второстепенным факторам, влияющим на развитие эрозии, относят: статическую устойчивость пород склона; гидрогеологические условия рельефа местности; наличие защитного растительного покрова; выветривание пород.

Методы исследований отступления линии бортов основаны, как правило, на полевых дистанционных наблюдениях [2, 3]. При очевидной их важности они локализованы на ограниченной территории и не могут охватить непрерывно достаточно длительный интервал времени. Поэтому основную роль в изучении многолетней динамики отступления линии бортов в карьерах и разрезах в результате эрозионных процессов приобретают материалы наблюдений, такие как космические и аэрофотоснимки, видеосъемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), наземное лазерное сканирование [4–6], получаемые с большими временными интервалами. Современные программно-технические средства получения и обработки фотоизображений и данных сканирования, совмещенные с ГИС-технологиями, позволяют получать с высокой точностью качественные и количественные характеристики образования и развития сезонных эрозионно-термоденудационных процессов в бортах и откосах угольных месторождений.

Известны и используются и так называемые «косвенные» методы, в основе которых лежат ботаническая индикация, исследование закономерностей оттаивания грунтов или геотермический метод, а также сведения о разрушении бортов, получаемые по данным маркшейдерских наблюдений.

Современные подходы к определению скорости отступления линии бортов в условиях конкретных месторождений твердых полезных ископаемых основаны, как правило, на работе с фотореалистичными моделями, получаемыми совмещением аэрофотоснимков с данными сканирования исследуемого участка.

В настоящее время перспективными остаются метод «наблюдательных створов» и метод обработки данных аэрофотосъемки разных лет [2–4]. Первый разработан достаточно давно и заключается в следующем. На участке наблюдений параллельно ли-

нии исследуемого борта на расстоянии 25–50 м от нее прокладывается профиль, оборудованный реперами и марками. На поверхности, где наблюдаются скопления талых и дождевых вод, размечается второй профиль, отстоящий от первого также на 25–50 м. Перпендикулярно выбранным профилям в сторону линии борта или склона прокладываются створы с марками. Расстояние между створами выбирается исходя из конкретных условий и составляет для сканера 50–100 м, расстояние между марками – 25 м.

На коротких участках оборудуется 10–15 створов, на протяженных – 50 и более. В намеченные сроки измеряют расстояния вдоль линии борта с учетом положения марок. Объем измерений и их обработка в этом случае минимальны, а полученные данные достаточно точны. Информацию о скорости отступления линии борта сверяют с результатами других видов наблюдений.

Метод изучения эрозионного отступления бортов с использованием аэрокосмических снимков основан на топографически точном совмещении разновременных и разномасштабных дистанционных данных с помощью программного пакета Scan Ex Image Processor V3.0 и проведении измерений с привлечением ГИС-среды MapInfo Professional 7.5 или аналогичной [2].

Для выявления пространственных закономерностей сезонной термоденудации за ее скорость принимают скорость отступления бровки термоцирков в их вершинной (наиболее удаленной от борта) части, где она максимальна, а обрыв склона близок к отвесному. Расстояние между такими точками в разные периоды измерений по данным аэрофотосъемки составляет величину, на которую отступил борт за счет сезонной термоденудации. Разделив это значение на время между периодами наблюдений, получают скорость отступления бровки термоцирка, которая отражает среднепериодную скорость термоденудации борта.

Инженерно-геологические условия залегания твердых полезных ископаемых рассматриваемого региона Западной Сибири обусловлены существованием здесь 2-х кардинально различных структурных планов: наличием грунтов осадочного происхождения по кровле месторождений, разрабатываемых открытым способом, склоновых к оползневым проявлениям и обрушениям в бортах карьеров и разрезов, и присутствием скальных пород на добычных горизонтах.

Рельеф местности юга Западной Сибири в основном холмисто-увалистый, пересекается местами невысокими хребтами, поверхность покрыта осиново-березовой и кустарниковой растительностью, в пределах горных отводов месторождений может быть занята толщей отвалов вскрышных пород. На территории встречаются изрезанные логами временные водотоки и речные долины, осложняющие рельеф. В силу инфильтрационного питания водных объектов по склонам увалов и хребтов развита сеть верховодок, способствующая в ряде случаев увлажнению грунтов по периметрам ведения вскрышных горных работ.

Гидрогеологические условия месторождений сложные. На формирование сети верховодок с учетом профиля местности в зоне бортов определяющее влияние оказывают естественные осадки в виде дождей и стока талых вод в весенний период. Климатические изменения воздействуют на режим схода снежного покрова, таяния грунтов и формирование уровня грунтовых вод. Величины фактических осадков для территории карьера или разреза зависят от межсезонного разброса за соответствующие периоды и могут отличаться по годам в 1.5–2 раза (по совокупности таяния снежного покрова и дождевых осадков) [7].

В ряде случаев рельеф естественной поверхности обуславливает сток атмосферных осадков в периоды дождей и таяния снегов к району ведения горных работ и предполагает скопление сезонных осадков в районе локализации нижних ярусов карьера или разреза. Детальное картирование рельефа местности по данным спутников Викимапии [1] и выделение естественных структур грунта, где образовались оползни, показывает, что основания оползней располагаются в пределах эрозионных врезов, а поверхности проблемных участков представляют собой, как правило, ложбины формы, близкой к параболической, покрытые грунтами переменной мощности, лежащими на скальном основании. Такое строение существенно осложняет гидрологические условия стока вод.

Естественные разрывные нарушения в осадочных грунтах формируются в основном под влиянием природно-климатических факторов сезонного характера в периоды, связанные с промерзанием верхних слоев грунта, появлением талых вод и выпадением ливневых дождей, наиболее активно способствующих самоорганизации и проявлению деструктивных эрозионных процессов в бортах и откосах на около контурных и вскрытых участках карьеров и разрезов.

Разрывные нарушения коренных пород практически утратившие свою подвижность, сопровождаются в основном зонами дробления и повышенной трещиноватости по глубине скального массива, осложнены естественным развитием геологических структур, влияющих на формы рельефа местности.

Это означает, что отседание борта или склона обусловлено не только вымыванием осадочных отложений под действием грунтовых вод по подошве, но и сопутствующими факторами, связанными с накоплением и движением атмосферных осадков и талых вод в процессе фильтрации и дренажа в осадочном массиве с учетом профиля естественной поверхности. Формирование эрозионных процессов обусловлено активностью геомеханических систем блочно-слоевых компонент осадочных грунтов, взаимодействующих в условиях попутного косого сжатия по разнопрофильным уклонам местности.

Наиболее информативными параметрами, определяющими образование зоны отседания, характеризующими его динамику, в том числе на этапе прогрессирующе опасной оползневой активизации, являются значения величин и скорости смещения грунта, глубина развития деформаций по зонам ослабления в массиве (образование и положение поверхности скольжения в результате фильтрации и дренажа), распространение активных смещений по площади отложения. Существенный вклад в образование и развитие термокарстов и трещин в массиве оказывает температурный режим в периоды оттаивания грунта.

Таким образом, развиваемые в настоящее время в геомеханике экспериментальные исследования по качественному и количественному описанию условий формирования отседаний и оползневых смещений борта карьера, обусловленных фильтрацией талых вод в осадочных грунтах и дренажом в коренных породах с учетом структуры массива на основе фундаментальной концепции их блочно-иерархического строения по М.А. Садовскому [4, 5] позволяют отработать вопросы инструментального мониторинга массива с целью определения развития дезинтеграционных процессов при проведении вскрышных работ в карьере, дают основу для повышения безопасности выполнения открытых горных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайт: <http://wikimapia.org/> Вид со спутников Викимании (юг Западной Сибири)
2. Пижанкова Е.И. Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) // Криосфера Земли. — 2011. — Т. XV, № 3.
3. Юрьев И.В. Проблемы эксплуатации объектов газового комплекса в береговой зоне Западного Ямала // Криосфера Земли. — 2009. — Т. XIII, № 1.
4. Опарин В.Н., Середович В.А., Юшкин В.Ф., Прокопьева С.А., Иванов А.В. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 5.
5. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
6. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Полянкин Г.Н., Гришин А.Н., Кузнецов А.О., Рублев Д.Е. Геомеханический мониторинг временной крепи железнодорожного тоннеля, проходимого в сложных горно-геологических условиях юга Западной Сибири // ФТПРПИ. — 2015. — № 4.
7. Сайт: <http://www.pogodaiklimat.ru/> Архив метеонаблюдений (юг Западной Сибири)

© В. Ф. Юшкин, 2017

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В КАРЬЕРЕ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ЦЕЛИКА В ПОЛЕ ШАХТЫ ИМ. ВАХРУШЕВА

Галина Евгеньевна Яковицкая

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)256-20-69, e-mail: YGE@ngs.ru

Марина Дмитриевна Шарапова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 190, e-mail: zinval@rambler.ru

Геннадий Иванович Кулаков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 188, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Проводилось электромагнитное исследование электромагнитного излучения в карьере при отработке угольного целика в поле шахты им. Вахрушева с использованием прибора типа ИЭМИ-1 (индикатор ЭМИ).

Ключевые слова: карьер, уголь, целик, выемка экскаватором, регистрация ЭМИ, прибор ИЭМИ-1.

ELECTROMAGNETIC RADIATION INVESTIGATION IN COAL PILLAR EXCAVATION AT VAKHRUSHEV OPEN PIT MINE

Galina E. Yakovitskaya

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Leading Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)256-20-69, e-mail: YGE@ngs.ru

Marina D. Sharapova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 190, e-mail: zinval@rambler.ru

Gennady I. Kulakov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Professor, Principal Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel.(383)205-30-30, extension 188, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Electro-magnetic radiation is investigated by IEMR-1 (indicator of EMR) device when a coal pillar is excavated at Vakhrushev open pit mine.

Key words: open pit mine, coal, pillar, excavation, EMR recording, IEMR-1 instrument.

В работе рассматривается отработка целика в зоне шахтного поля отработанной шахты им. Вахрушева. Шахта располагалась в г. Киселевске Кемеровской области, исследуемый участок шахтного поля расположен севернее центра города и примыка-

ет к району железнодорожного вокзала г. Киселёвск с западной стороной. Шахта сдана в эксплуатацию в 1939-1940 гг. В пределах северной части шахтного поля расположена зона Афонинского геологического нарушения. Шахтное поле включает несколько чередующихся антиклинальных и синклиналиных складок. Запасы угля включают пласты средней мощности 2-3 ~ 3.5 м и пласты мощностью 4-5-7-10-12 м. Угол падения пластов от 0-20° до 65-80°. Угли различных марок от Г, Д до коксовых. В годы войны и первые послевоенные годы отработка мощных пластов велась слоевыми системами, мощные крутопадающие пласты обрабатывались щитовой системой, в том числе эластичными щитами. Особо мощные крутопадающие пласты обрабатывались спаренными щитами [1-2].

В 60-70 годы для отработки мощных пологих пластов развивалась комбинированная система разработки, включающая отработку в два слоя. Верхний слой обрабатывался лавой мощностью 1.5-1.7 м, на почве которой монтировалось металлическое перекрытие из переплетённых по падению и простиранию стальных полос из углесталей. Поверх которых укладывалась металлическая сетка – «Рабица» в два слоя. Посадка лавы верхнего слоя производилась на уложенные вдоль забоя костры из деревянных стоек длиной 1.5-1.7 м. Далее в той же последовательности продолжали отработку лавы на последующие шаги посадки (обычно по 5 м) [1].

После отработки первого слоя на 30-50 м по простиранию и на 30-50 м по падению можно приступить к отработке нижнего слоя (проведение необходимых выработок в пределах нижнего слоя). Отбойку угля в нижнем слое производят лентами по 1.5-2.0 м [1, 2, 4].

Рассмотренная система отработки в два слоя с металлическим перекрытием была разработана специалистами КузНИУИ (г. Прокопьевск) в 50-60 годы прошлого века. В дальнейшем комбинированная система развивалась как применительно к отработке пологих пластов, так и мощных крутопадающих пластов.

При отработке пластов большой мощности упомянутыми системами в отработанном пространстве оставалось значительное количество целиков различных размеров, как технологических, так и для охраны различных сооружений на поверхности (железные дороги, склады, электролинии, шахтные стволы), а также охранные целики под реками, озерами и т.п. Запасы угля в них достигали 1.7 млн тонн. В процессе реструктуризации угольной промышленности в России такие целики обрабатываются открытыми системами разработки [2, 3, 5].

В качестве примера рассмотрим отработку целика на шахте имени Вахрушева (г. Киселёвск) по пласту Горелой, мощностью 7-8 м, длина целика по простиранию 15-18 м, угол падения 74°. Целик обрабатывался открытым способом. При его отработке в качестве карьера использовался провал, оставшийся от подземных горных работ. Для выемки угля использовался экскаватор, который размещался на борту провала, что позволило отработать запасы в целике на глубину опускания ковша экскаватора.

При отработке упомянутого целика специалистами ИГД СО РАН были выполнены эксперименты по исследованию электромагнитного излучения (ЭМИ) массива угля и прилегающих пород с использованием прибора ИЭМИ-1 (рис. 1) [3, 6]. В точках замеров были пробиты ломиком скважины (рис. 2), ориентированные горизонтально или вертикально на глубину 0.2-0.3 м. В скважине размещался зонд, на удалённом конце которого закреплена антенна, а регистрируемый прибор ИЭМИ-1 размещался вне скважины. В каждой скважине бралось по два отсчета, один вблизи дна

скважины, второй на глубине 0.1 м от устья скважины. Результаты замеров приведены в таблице.

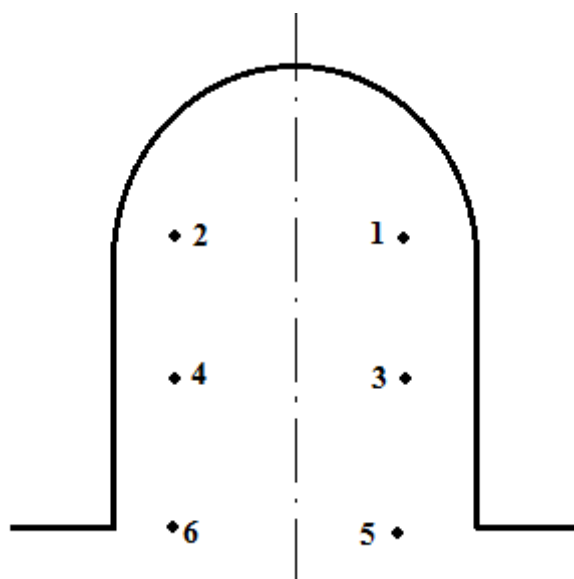


Рис. 1. Канавка отбитого угля (1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки замеров ЭМИ)

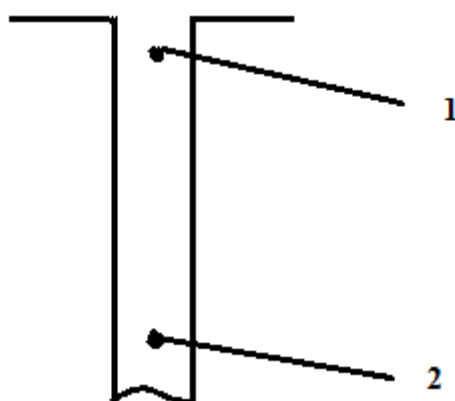


Рис. 2. Скважина (1 – точка замера в устье, 2 – точка замера в дне)

Таблица

Отсчеты по шкале прибора ИЭМИ-1

Номер скважины	Отсчеты по шкале прибора, мВ	
	Дно скважины	Устье скважины
1	93, 91, 93, 101	88, 59, 84, 86
2	94, 95, 86	83, 55, 81, 48
3	93, 59, 94, 86	86, 58, 83, 85
4	93, 80, 75, 80	78, 76, 74, 75
5	90, 82, 92	77, 74, 72, 74
6	96, 93, 88, 86	74, 72, 72, 73
σ_{cp}	86	73

Уголь пласта Горелого опасен по самовозгоранию, угольная пыль опасна по взрывам. Содержание метана с глубины 150 м достигло 15 м³/т, постепенно увеличиваясь с глубиной.

В условиях Кузбасса с глубины 150-250 м стали фиксироваться внезапные выбросы угля и газа метана [3] и горные удары [2].

В пределах шахты № 12 (расположенной восточнее с шахтой им. Вахрушева на той же глубине) при подготовке горизонта IV (H=340 м) и проведении выработок рудного двора и первых квершлагов на гор. 0.0 м отмечены два внезапных выброса. Первый на пласте «Мощном» 12.09.90 г. при вскрытии квершлагом № 1 (выбросило 682 т угля и мелкой породы и выделилось 41400 м³ газа метана). Выброшенной горной массой квершлага был засыпан на расстоянии более 74 м при общей длине квершлага 85 м. На том этапе это был самый мощный внезапный выброс в Кузбассе. При этом выбросе пострадавших не было благодаря четко организованного вскрытия пласта угля администрацией и службой шахты № 12.

Второй выброс вблизи шахты им. Вахрушева произошёл также на шахте № 12 22.08.1997 г. при вскрытии квершлагом № 5 на горизонте ±0.0 пласта «Проводник Горелого». Было выброшено 67 т угля и 1200 м³ газа метана, глубина от поверхности 250 м [9].

К вопросу о горных ударах на шахтах Кузбасса. Исключительно мощный горный удар произошёл 6.03.1982 г. на шахте «Усинская». Шахта находится на юге Кузбасса и относительно близко расположена к Алтае-Саянской сейсмической зоне. В 1982 г. на шахте произошли два горных удара. Первый 6.03.1982 г., второй через шесть месяцев. Шахта отработывала пласт № 6 мощности около 8 м в два слоя. Боковые породы повышенной прочности. Шахта вскрыта 5-ю уклонами длиной 1600 м каждый, пройденными по отработываемому пласту. Размеры охранного целика уклонов - 80 м. Выше отмеченные замеры ЭМИ выполнялись в целях повышения сведений о газосодержании угольных пластов в зоне ведения горных работ.

Внезапные выбросы угля и газа – самопроизвольное мгновенное разрушение части угольного пласта или участка вблизи забоя горной выработки, сопровождающееся отбросом выброшенного угля и усиленным газовыделением. Происходит обычно при внезапном изменении напряженного состояния, насыщенного газом метаном угля или в результате резкого сброса давления газа на плоскости забоя, которые становятся следствием мгновенного обнажения пласта при вскрытии его горной выработкой, в частности вблизи геологических нарушений, вывалообразований, при взрывной отбойке [1]. Внезапный выброс связан с комплексом физико-механических и физико-химических процессов в угольном пласте при взаимодействии углерода и метана. С одной стороны, и при взаимодействии структуры угольного пласта, метана, по данным современной физико-химии, в том числе водорода и тяжелых углеводородов.

Вопросы абсорбции и десорбции угля и газа [8].

Абсорбция – поглощение вещества (абсорбента) из газообразной среды жидкостью или твердого тела (абсорбентом).

Сорбция газов и паров – поглощение газа или пара твердым телом (сорбентом).

Десорбция – удаление (сжатие) адсорбированных молекул какого-либо вещества с поверхности разных фаз может осуществляться химическим способом с помощью какого-либо химического соединения (например, удаления с минеральной поверхности ксантогената или жирных кислот с помощью сернистого натрия), физическими

процессами – отмывание водой, нагреванием, обработкой в ультразвуком или электромагнитном поле и т.п. [1].

Адсорбция – поглощение какого-либо вещества из раствора или из газообразной среды поверхностным слоем твердого тела или жидкости (адсорбента). Адсорбция связана с особым состоянием молекул на границе раздела фаз. Различают физическую адсорбцию и химическую адсорбцию. В первом случае адсорбированные молекулы сохраняют свою индивидуальность, во-втором – образуются соответствующие химические соединения [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурчаков А.С., Гринько Н.К., Черняк И.Л. Процессы подземных горных работ. М. Недра. 408 с. V.2, 3. Приложение гибкий переплёт. – С. 120-124.
2. Ногих С.Р. Воспроизводство шахтного фонда действующих, строящихся и восстановление шахт. – Томск. Изд-во Томского института, 2002. – 240 с.
3. Чернов О.И., Розанцев Е.С. Предупреждение внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах. М. «Недра». 1965. – 211 с.
4. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Изд-во «Параллель», 2008. – 385 с.
5. Скрицкий В.А. Механизм возникновения очагов самовозгорания угля в шахтах и способы их предотвращения. Отв.ред. чл.-корр. РАН В.Н. Опарин. – Новосибирск. Изд. ФБОУ ВПО ИГГАВТ.
6. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. М.Б. Гохберга / Ин-т физики Земли АН СССР. – М. 1988. – 243 с.
7. Мавлякова Г.А., Уланов В.Н., Абдуллабоков К.Н., Хусамитдинов С.С. Исследование вариаций параметров естественных электромагнитных полей в целях прогноза землетрясений // Узбекский геологический журнал. – 1970– № 5. – С. 11-15.
8. Малинникова О.Н., Фейт Г.Н. Термодинамические и механические процессы в угольном пласте при образовании техногенного очага опасности динамического явления. / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы. Том.1. Геотехнология. – Новосибирск: Институт горного дела СО РАН, 2007. С. 250-254.
9. Мурашов В.И., Зыков В.С., Лудзиш В.С. Состояния и проблемы борьбы с газодинамическими явлениями на шахтах России. // «Безопасность угля в промышленности» - М: 1993 - № 12. - С. 17-20

© Г. Е. Яковицкая, М. Д. Шаранова, Г. И. Кулаков, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА

Илья Олегович Шахторин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (923)399-32-68, e-mail: Scorpion22@bk.ru

Проектирование машин ударного действия включает в себя множество операций по определению рациональных геометрических параметров. Такие работы называют доводкой машины. Доводка – осуществляется на физических моделях, что требует временных и материальных затрат. Применение современного программного обеспечения позволяет облегчить данный процесс.

Ключевые слова: пневмоударник, рабочий цикл, расположение кромок, энергетические параметры, бурение.

DEFINITION OF PARAMETERS DOWNHOLE AIR HAMMER

Il'ya O. Shakhtorin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (923)399-32-68, e-mail: Scorpion22@bk.ru

The development of percussion machines involves a good deal of operations to establish rational geometrical parameters. These operations are known as finishing operations. The finishing is performed on physical models with substantial time and material expenditures. The state-of-the-art computing technologies facilitate this job in many aspects.

Key words: air hammer, working cycle, edge location, energy parameters, drilling.

Бурение шпуров и скважин при помощи погружных пневмоударников получило широкое распространение в современной горной и строительной промышленности. В настоящее время существует множество различных конструкций буровых машин ударного действия отечественного и зарубежного производства. Они отличаются техническими характеристиками, диаметрами, рабочим давлением и т. д. Работают пневмоударники совместно с буровыми долотами, предназначенными для бурения пород различной крепости и трещиноватости, могут применяться при отработке полезных ископаемых как подземным, так и открытым способом [1].

Проектирование машин ударного действия включает в себя множество операций по определению рациональных геометрических параметров, таких как: расположение впускных и выпускных кромок, объемы рабочих камер, величина рабочего хода и т.д. Данные работы принято называть доводкой машины. Доводка – весьма трудоемкий и кропотливый процесс и, в большинстве случаев, осуществляется на физических моделях, что требует существенных временных и материальных затрат.

Использование современного программного обеспечения позволяет существенно упростить процесс доводки машины ударного действия. Рассмотрим подробнее пакет программ Simulation X [2]. Данная программа позволяет моделировать процессы воздухораспределения, происходящие в ударной машине, а также вносить изменения в

геометрические параметры воздухораспределительной системы. С помощью Simulation X можно изменять множество параметров ударной машины и одновременно наблюдать за изменениями ее выходных параметров, таких как: энергия единичного удара, частота ударов, скорость ударника.

В Институте горного дела СО РАН был разработан погружной пневмоударник, предназначенный для бурения крепких пород, малого диаметра (рис. 1), работающий по беззолотниковой схеме воздухораспределения [3]. Для осуществления доводки данной машины была использована компьютерная программа Simulation X, для этого пневмоударник был представлен в виде расчетной модели, содержащей набор пневматических элементов: объемы, дроссели, цилиндры (рис. 2). Полученная схема была перенесена в программу для дальнейших расчетов.

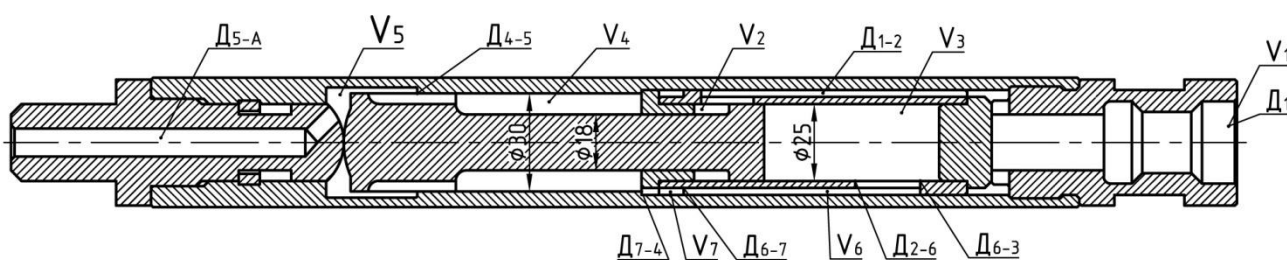


Рис. 1. Схема пневмоударника АШ-43м

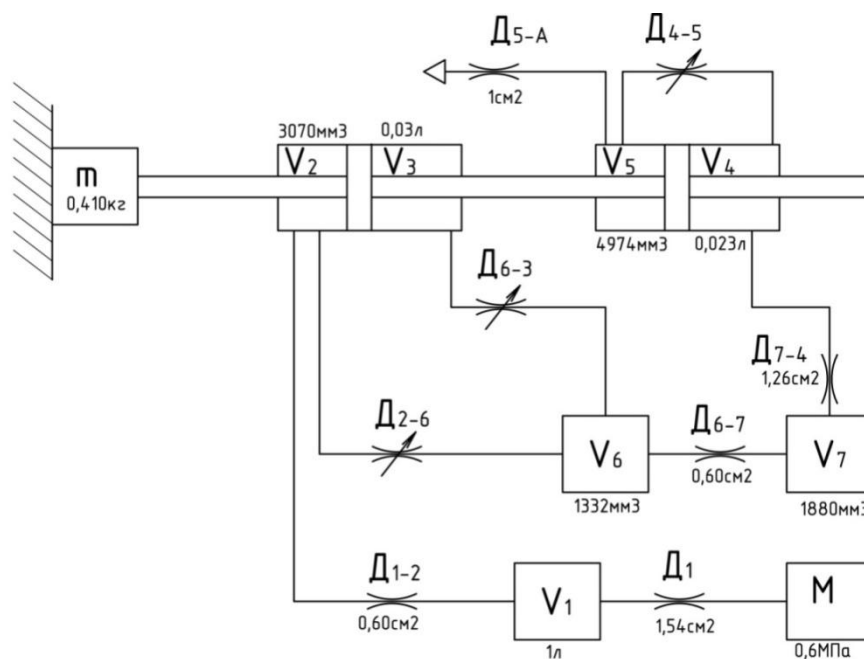


Рис. 2. Расчетная модель АШ-43м

Оценка эффективности системы воздухораспределения пневматических ударных механизмов производят по индикаторным диаграммам давления в рабочих камерах пневмоударника [4]. После анализа диаграмм можно сделать выводы об эффективно-

сти работы машины в целом. Simulation X позволяет получить диаграммы давлений в рабочих камерах пневмоударника (рис. 3).

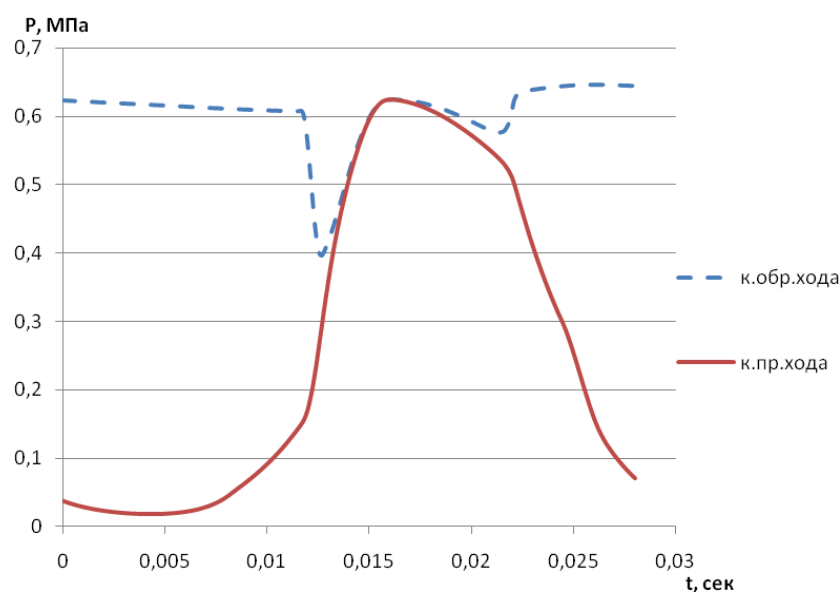


Рис. 3. Диаграммы давлений в рабочих камерах, полученные в Simulation X

Проведены съемки аналогичных диаграмм на физической модели пневмоударника при помощи пьезодатчиков. Сигнал от датчиков записывается на персональный компьютер при помощи программы LGraph [5]. Таким образом, получены диаграммы одного рабочего цикла погружного пневмоударника (рис. 4).

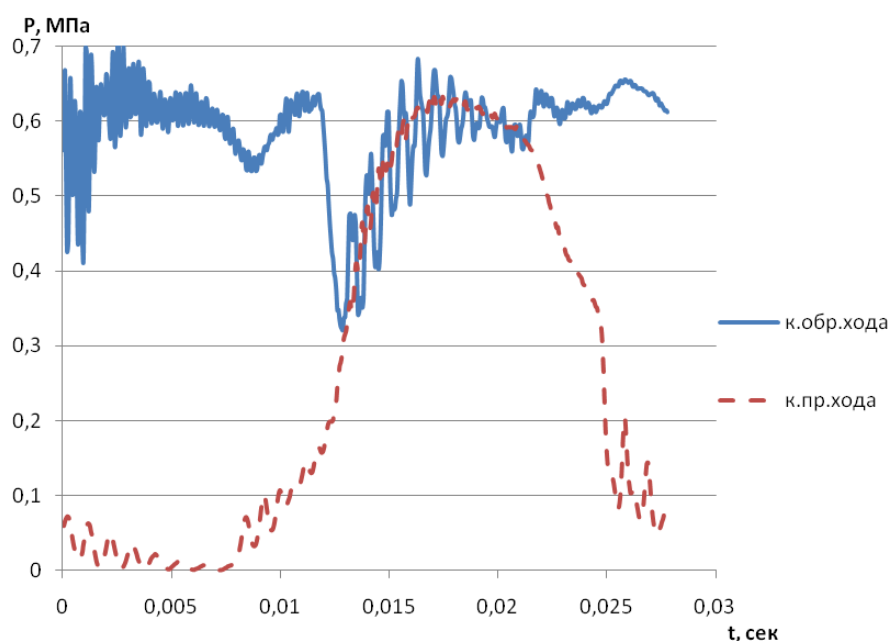


Рис. 4. Диаграммы давлений в рабочих камерах, полученные пьезодатчиками

При сравнении диаграммы, полученной при помощи расчетной модели, с диаграммой реальной машины можно отметить, что они достаточно полно совпадают друг с другом (рисунок 3 и 4). Следовательно, расчетная модель адекватно отражает рабочий процесс реального пневмоударника и может быть использована для проведения дальнейших исследований.

Созданная расчетная модель позволяет изменять геометрические параметры пневмоударника, и одновременно наблюдать за изменением его энергетических параметров. Для определения рациональных значений основных геометрических параметров, проведен расчет значений энергетических параметров пневмоударника при различных вариантах расположения основных кромок, отвечающих за впуск воздуха в камеру прямого хода и выхлоп [6].

Длина хода ударника до открытия кромки впускного канала в камеру прямого хода L_1 (рис. 5), является важным геометрическим параметром машины ударного действия, так как определяет величину холостого хода, переводит машину с холостого хода на рабочий, устанавливает размер воздушной подушки.



Рис. 5. Расположение впускной кромки камеры прямого хода

Расположение кромки, определяющей длину L_1 , изначально было установлено на расстоянии 37 мм от положения ударника в момент удара, которое было выбрано исходя из многолетнего опыта конструирования подобных машин. В дальнейшем, при вычислительных экспериментах были определены основные энергетические параметры машины при изменении расположения кромки от 27 мм до 47 мм с шагом 2 мм. Принятый диапазон обусловлен конструктивными ограничениями, выходя за рамки которых, нарушается устойчивая работа машины. Зависимость энергии удара от длины хода ударника до открытия кромки впускного канала в камеру прямого хода представлена на рис. 6.

Результаты, представленные на графике, позволяют сделать вывод о том, что максимальное значение энергии удара достигается при расположении кромки впускного канала в камеру прямого хода на расстоянии от 33 мм до 37 мм от положения ударника в момент удара [7].

Исследовано влияние длины хода ударника до закрытия кромки выпускного канала камеры прямого хода L_2 (рис. 7) на энергетические параметры пневмоударника. Данная кромка открывает выхлопные окна, после чего начинается выхлоп отработанного воздуха на забой скважины, также устанавливает величину прямого хода ударника.

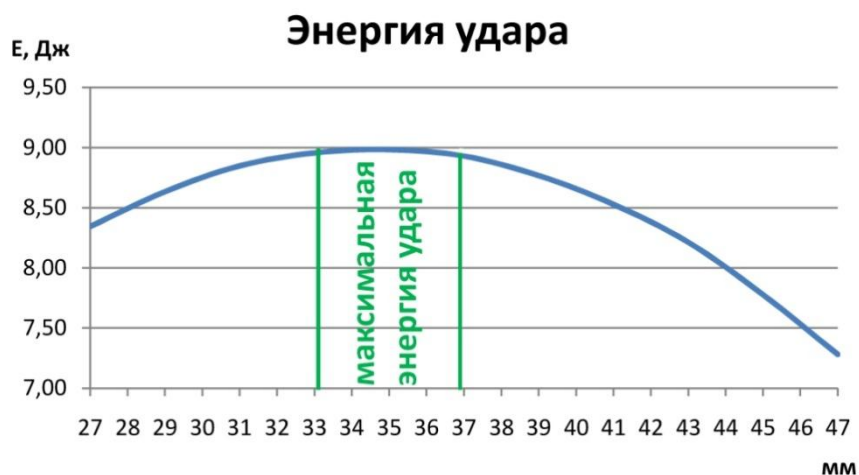


Рис. 6. Зависимость энергии удара от длины хода ударника до открытия кромки впускного канала в камеру прямого хода



Рис. 7. Расположения выпускной кромки камеры прямого хода

Расположение данной кромки изначально было установлено таким образом, чтобы ее закрытие происходило на расстоянии 23 мм после начала движения ударника, находившегося в крайнем левом положении. Это расстояние было выбрано исходя из многолетнего опыта конструирования подобных машин. В дальнейшем при вычислительных экспериментах было проанализировано изменение основных энергетических параметров машины при изменении расположения кромки от 13 мм до 33 мм с шагом 2 мм. Принятый диапазон обусловлен конструктивными ограничениями, выходя за рамки которых, нарушается устойчивая работа машины. Зависимость энергии удара от длины хода ударника до закрытия кромки выпускного канала камеры прямого хода представлена на рис. 8.

Результаты, представленные на графике, позволяют сделать вывод о том, что максимальное значение энергии удара достигается при расположении кромки выпускного канала камеры прямого хода на расстоянии от 25 мм до 31 мм от положения ударника в момент удара.

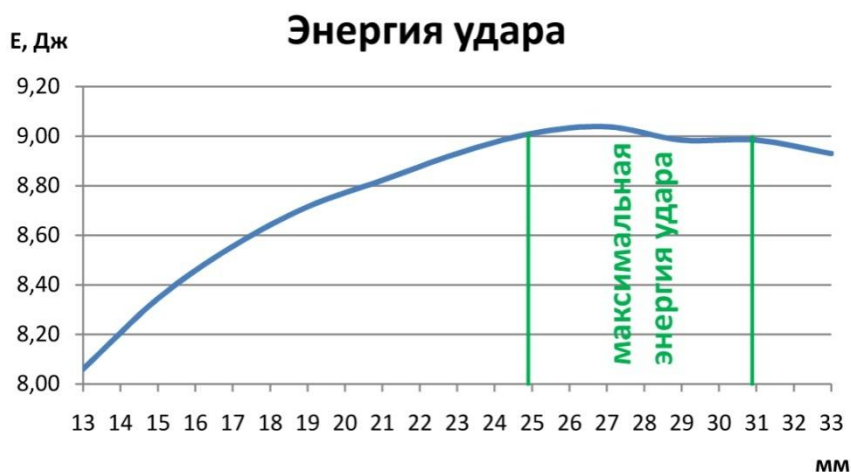


Рис. 8. Зависимость энергии удара от длины хода ударника до закрытия кромки выпускного канала камеры прямого хода

Таким образом, определены конструктивные параметры погружного пневмоударника, обеспечивающие наибольшую энергию удара, а также позволяющие максимально эффективно использовать подводимую энергию сжатого воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахторин И. О. Буровой инструмент для горных и строительных работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 4. – С. 224–228.
2. Официальный сайт SimulationX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simulationx.com/>
3. Патент РФ на П.М. № 121854 РФ. Погружной пневмоударник. / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, В.Н. Карпов // Оpubл. БИ – 2012. - № 31.
4. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. [Текст] / Новосибирск: Наука, 1985. – 134с.
5. Официальный сайт компании Lcard [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lcard.ru/>
6. Репин А.А., Кокоулин Д.И., Шахторин И.О. Создание исполнительного органа для бурения скважин малого диаметра. [Текст] / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016. – № 3. – С. 101-108.
7. Клишин В.И., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б., Алексеев С.Е., Шахторин И.О. Обоснование типа и параметров погружного пневмоударника для увеличения скорости проходки скважин малого диаметра [Текст] / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015. – № 6. – С. 65-71.

© И. О. Шахторин, 2017

К ВОПРОСУ УЧЕТА ПОРШНЕВОГО ДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ТОННЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА МЕТРОПОЛИТЕНА

Дмитрий Владиленович Зедгенизов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доп. 339, e-mail: dimzed2001@mail.ru

Рассматривается задача автоматического регулирования частоты вращения ротора стационарного вентилятора метрополитена мелкого заложения в условиях существенного аэродинамического возмущения от поршневого действия поездов. Обсуждаются результаты натурного эксперимента по измерению производительности вентилятора, работающего на пониженной частоте вращения ротора при разной интенсивности движения поездов. Оценивается степень снижения фактического расхода воздуха на пассажирской платформе станции метрополитена, вызванного движением поездов.

Ключевые слова: система регулирования, частота вращения ротора, управление проветриванием, вентилятор, метрополитен.

CORRECTION FOR PISTON-TYPE EFFECT OF TRAIN TRAFFIC IN AUTOMATED ROTOR FREQUENCY CONTROL OF SUBWAY TUNNEL FAN

Dmitry V. Zedgenizov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Assistant Professor, Senior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 339, e-mail: dimzed2001@mail.ru

Under consideration is the problem of automated control of rotor rotation frequency of stationary fan in shallow subway under intensive aerodynamic disturbance generated by piston-type train traffic. Discussion covers the in-situ test measurements of fan performance operating at lowered rotor rotation frequency and different train traffic intensities. It is estimated the actual reduction in air flow consumption thanks to train traffic at subway passenger platform.

Key words: controlling system, rotor rotation frequency, aeration management, fan, subway.

Автоматическое регулирование производительности тоннельных вентиляторов метрополитена в соответствии с требуемым воздухораспределением является актуальной задачей в связи с ростом требований к энергосбережению всего оборудования метрополитена. Модернизация вентиляторов, осуществляемая в последнее время метрополитенами, позволяет регулировать производительность тоннельных вентиляторов с помощью преобразователя частоты питающего напряжения, изменяя таким образом, энергопотребление на проветривание. Однако, как показали натурные эксперименты, при уменьшении частоты вращения вала вентилятора в условиях действующего метрополитена наблюдается существенное снижение расхода воздуха, проходящего через вентилятор, от его требуемого значения. В статье рассматриваются результаты эксперимента по измерению расхода воздуха через тоннельный вентилятор (ТВ) станции «Октябрьская» Новосибирского метрополитена.

Объектом исследований являлся модифицированный тоннельный вентилятор ВОМД-24 с диаметром рабочего колеса 2400 мм. Вал вентилятора приводился во вращение асинхронным электродвигателем 4АМ315М12, мощностью 55 кВт, скоростью вращения 500 об/мин. Для изменения частоты вращения вала вентилятора использовался преобразователь частоты Altivar 61 с выходной частотой тока 0,5 - 500 Гц. Схема участка вентиляционной сети метрополитена приведена на рис. 1.

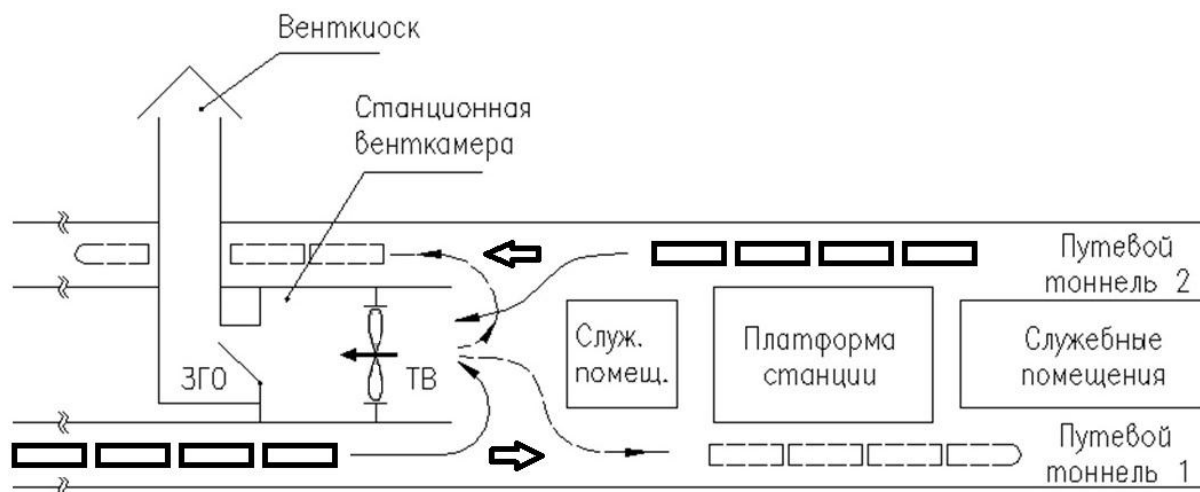


Рис. 1. Схема участка вентиляционной сети метрополитена г. Новосибирска в окрестности станции «Октябрьская»:

ТВ – тоннельный вентилятор с приводным электродвигателем и преобразователем частоты тока; ЗГО – затвор гражданской обороны

Эксперимент проводился при двух частотах тока, питающего электродвигатель вентилятора:

- 18 Гц, что определялось максимальной допустимой скоростью вращения вентилятора (установившийся расход воздуха на этой частоте составил $50 \text{ м}^3/\text{с}$);
- 10 Гц, что являлось 55 % от допустимой скорости вращения вентилятора (при этом расход воздуха составил $27,5 \text{ м}^3/\text{с}$).

Целью эксперимента являлось определение степени влияния поездов, движущихся в метрополитене на производительность станционного тоннельного вентилятора [1 - 3]. Исследования проводились в различное время суток, при нескольких интенсивностях движения поездов на линии метрополитена.

На рис. 2 представлены графики изменения расхода воздуха через вентилятор при заданной производительности вентилятора $27,5$ (10 Гц) и $50 \text{ м}^3/\text{с}$ (18 Гц). Интенсивность движения поездов в этом эксперименте составила 7 и 15 пар в час.

Поршневое действие поездов, подходящих к вентиляционной камере (ВК) вызывает увеличение расхода воздуха через вентилятор, работающий в режиме вытяжки воздуха со станции. Как только поезда удаляются от ВК, расход воздуха через ТВ снижается, что особенно заметно на пониженных частотах вращения ротора вентилятора.

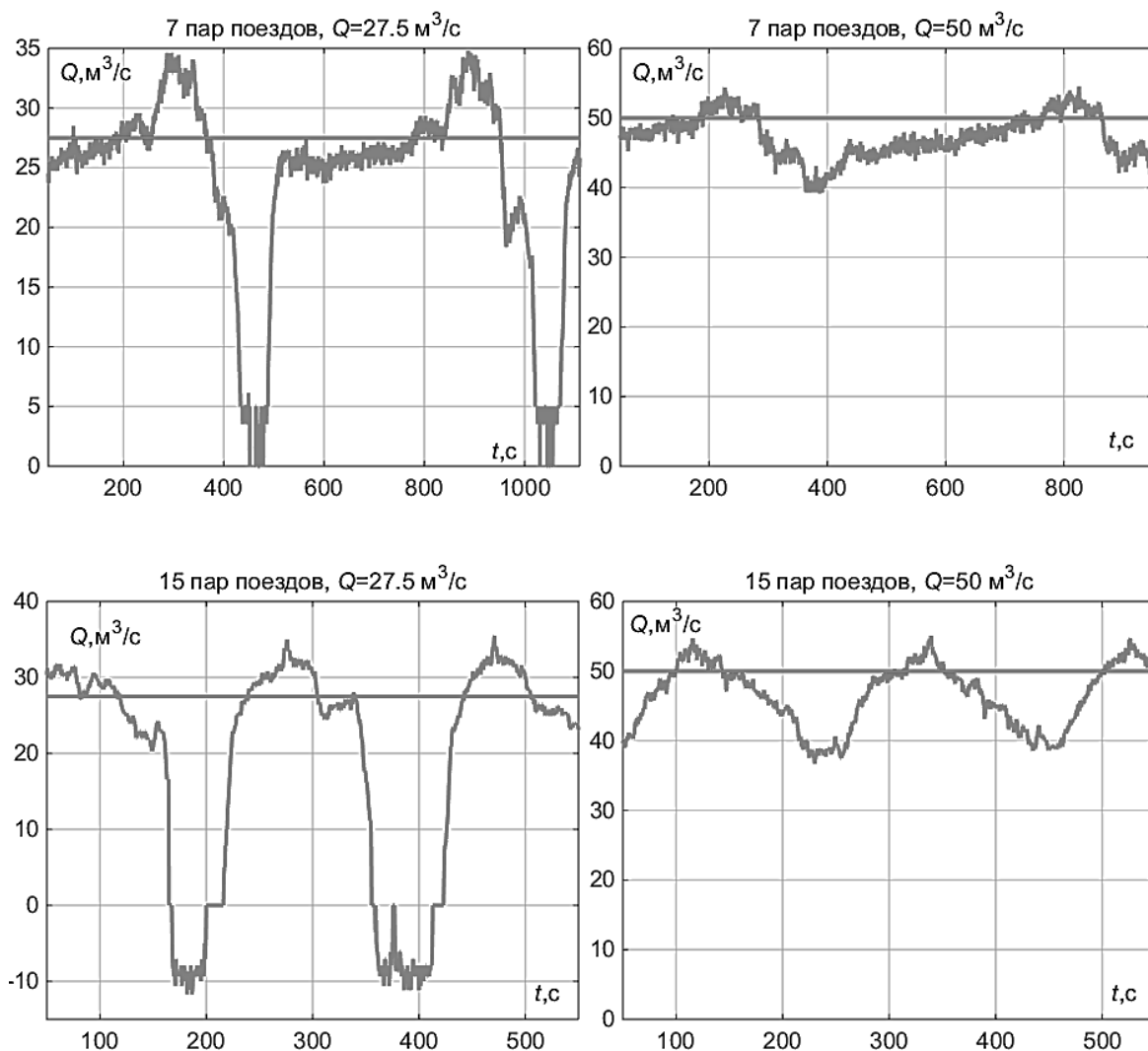


Рис. 2. Фактический расход воздуха через вентилятор при поршневом действии поездов, полученный в результате натурного эксперимента

Для дальнейшего исследования на основе анализа массива экспериментальных данных были определены следующие величины [4]:

- величина Q^+ максимального превышения измеренного расхода воздуха над его установившимся значением (при подходе поездов к ВК), $\text{м}^3/\text{с}$;
- величина Q^- максимального снижения измеренного расхода воздуха по сравнению с его установившимся значением (при удалении поездов от ВК), $\text{м}^3/\text{с}$;
- интервал времени Δt между проходами поездов мимо ВК, с.

Указанные величины представлены на рис. 3.

Исследованиями установлено, что амплитуда колебаний производительности вентилятора не зависит от интенсивности движения поездов, а определяется временем между проходами обоих поездов мимо вентиляционной камеры Δt . При увеличении Δt отклонение фактического расхода воздуха через вентилятор от его установившегося значения снижается, а наибольшее снижение расхода воздуха через стационарный вентилятор наблюдается при одновременном проходе поездов мимо венткамеры [5].

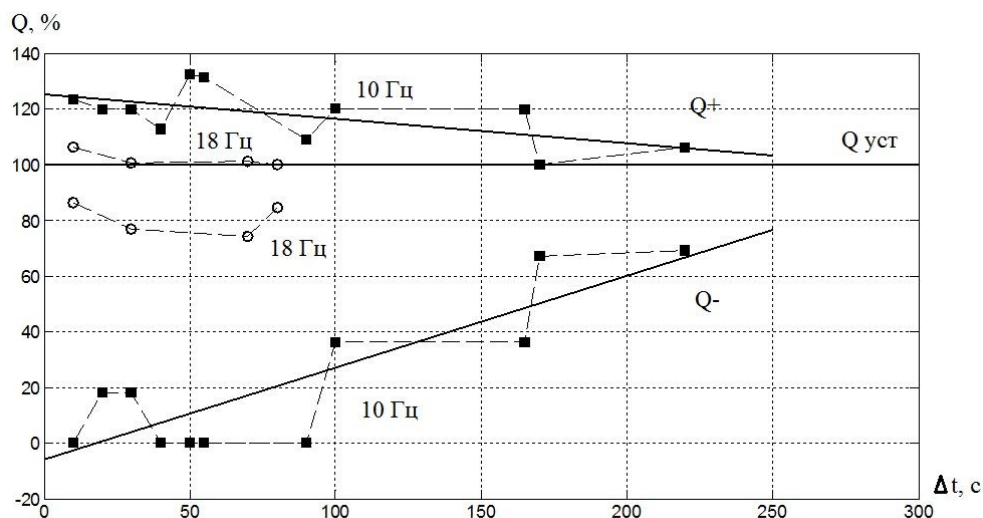


Рис. 3. Изменение величины Q^+ и Q^- в зависимости от интервала времени Δt между проходами поездов мимо ВК

В ходе дальнейших исследований возникла необходимость оценить степень влияния поездов на производительность частотно-регулируемого тоннельного вентилятора. Для этого по графикам рис. 2 были вычислены площади S^+ превышения фактического расхода воздуха, проходящего через вентилятор над установившимся значением его производительности без влияния поездов, а также площади S^- , соответствующие снижению фактического расхода ТВ поршневым действием движущихся поездов метро. На рис. 4 представлено изменение указанных величин в зависимости от промежутка времени между проходами поездов мимо венткамеры Δt при различной интенсивности движения поездов (7, 12 и 15 пар поездов на линии в час) для максимальной и минимальной частоты вращения ротора вентилятора.

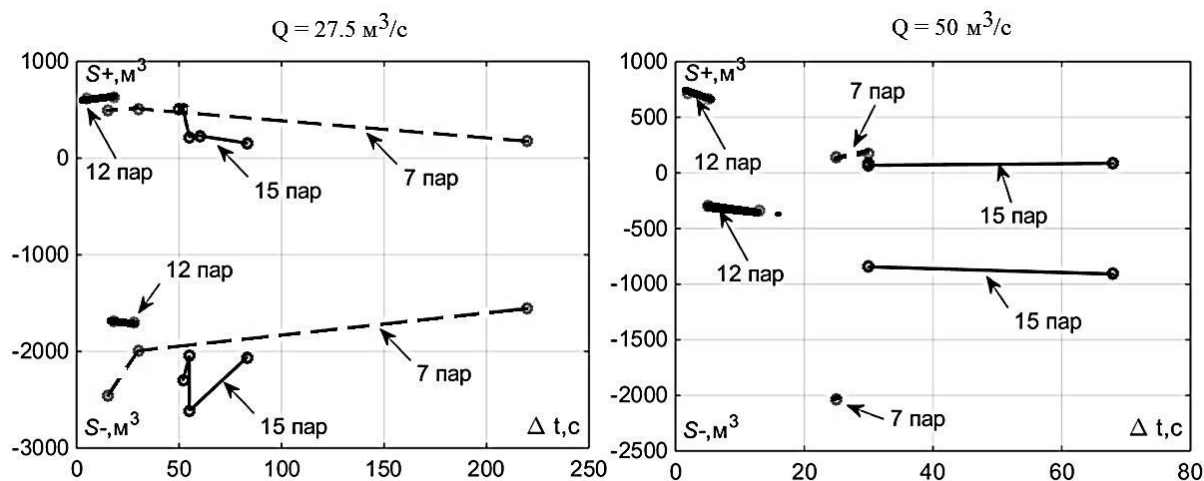


Рис. 4. Изменение площади S^+ и площади S^- при различной интенсивности движения поездов

Исследованиями установлено, что поршневое действие поездов снижает объём воздуха, проходящий через станционный тоннельный вентилятор, работающий на вытяжку, в диапазоне от 1000 м³ до 2600 м³ за одну встречу поездов, что эквивалентно снижению производительности вентилятора от 8% до 39,3%. Указанное снижение объёма воздуха, проходящего через ТВ не зависит от интенсивности движения, а определяется случайной комбинацией встречных поездов, прошедших за определённый период мимо венткамеры и частотой вращения вала вентилятора.

Проведённые исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Амплитуда колебаний производительности вентилятора не зависит от интенсивности движения поездов, а определяется временем между проходами обоих поездов мимо вентиляционной камеры.

2. Поршневое действие поездов снижает объём воздуха, проходящий через станционный тоннельный вентилятор, работающий на вытяжку, в диапазоне от 1000 м³ до 2600 м³ за одну встречу поездов, что эквивалентно снижению производительности вентилятора от 8% до 39,3%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов – Новосибирск: Наука, 2006. – 164 с.
2. Красюк А. М., Косых П. В., Русский Е. Ю. Влияние возмущений воздушного потока от поршневого действия поездов на туннельные вентиляторы метрополитенов // ФТПРПИ. – 2014. – № 2. – С. 144–153.
3. Юркевич В.Д., Мальцев И.В., Зедгенизов Д.В. Управление воздухораспределением в системе тоннельной вентиляции метрополитена // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием «Индустриальные информационные системы» - ИИС-2015. Новосибирск, КТИ СО РАН, 2015, С. 44 – 45.
4. Зедгенизов Д. В., Розенталь П. А. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик управления регулируемого частотой вращения тоннельного вентилятора / Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена-2013». Изд. ИГД СО РАН. – Новосибирск. – 2013. – С. 333–340.
5. Попов Н. А., Красюк А. М., Лугин И. В., Павлов С. А., Зедгенизов Д. В. Совершенствование методических основ разработки систем тоннельной вентиляции метрополитенов мелкого заложения // ФТПРПИ – 2014. – № 5. – С. 175–186.

© Д. В. Зедгенизов, 2017

РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАСПОРНОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПИ ИЗ ПРЕССОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Геннадий Алексеевич Ефентьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, тел. (383)205-30-30, доп. 175

Юрий Иванович Николаев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории подземной разработки угольных месторождений, тел. (383)205-30-30, доп. 175, e-mail: 58nikolaev@mail.ru

Предложен метод расчета силовых показателей распорной анкерной крепи, выполненной из прессованной древесины хвойных пород дерева.

Ключевые слова: набухание, сцепление, усилие закрепления, несущая способность, сопротивление, распор.

COMPUTING LOAD-BEARING CHARACTERISTICS OF EXPANSION-TYPE ANCHOR SUPPORTS MADE OF COMPRESSED WOOD

Gennady A. Efent'ev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Underground Coal Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 175

Yury I. Nikolaev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Junior Researcher, Underground Coal Mining Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 175, e-mail: 58nikolaev@mail.ru

The method is proposed to compute power characteristics of expansion-type anchor supports made of compressed coniferous wood.

Key words: bulking, cohesion, holding force, bearing capacity, resistance, thrust.

В практике горной промышленности для решения вопросов управления горным давлением разработан огромный арсенал средств крепления. Для поддержания горных выработок наибольшее распространение получила анкерная крепь. Нашли свое применение обычные механические анкеры, канатные анкеры, анкеры закрепляемые по всей длине химическими растворами и смесями на цементной основе с металлическими, железобетонными, деревянными и полимерными штангами [1]. В последние годы все более широкое распространение получают анкерные крепи с фрикционным закреплением [2]. Поиски решения вопросов, имеющих место при креплении выработок, проводимых в сильно трещиноватых, обводненных и мерзлых породах привели к разработке распорного анкера. Распорный анкер представляет собой штангу из прессованной древесины твердых пород дерева. Внутренний и внешний концы штанги выполнены с конусообразными скосами. На внешнем конце штанги установлена

опорная плита, выполненная из древесного пластика. Для крепления горных выработок анкер вгоняется с натягом в предварительно пробуренный шпур до контакта с породой опорной плиты, фрикционно закрепленной на штанге [3].

После установки распорного анкера в шпур в процессе набухания прессованной древесины штанги создаются распирающие усилия и возникают силы сцепления штанги с боковыми стенками шпура. Они позволяют скреплять между собой слои окружающих анкер горных пород, надежно удерживать их на штанге силами трения и пришивать к устойчивому горному массиву. Кроме того анкер является активным и создает в окружающих его породах зону всестороннего сжатия. Напряжения всестороннего сжатия увеличивают силы внутреннего трения горных пород. Этим достигается повышение их прочности и устойчивости.

Назначение любой конструкции анкерной крепи определяется показателями, необходимыми для обеспечения безопасных условий эксплуатации выработок. Среди прочих к ним относятся силовые показатели крепи, такие как усилие закрепления замка анкера, несущая способность, сопротивление. В настоящей статье приводится расчетный метод определения силовых показателей распорной анкерной крепи, основанный на результатах ранее выполненных авторами исследований по физическому моделированию, направленных на получение фактических данных о прочности закрепления распорного анкера в разных условиях и породах [3].

Расчетом предусматривается достижение следующих результатов:

1. Определение штанги на разрыв.
2. Установление допустимых значений силовых показателей распорного анкера.
3. Обоснование рациональной длины замковой части распорного анкера.

Исходными данными для производства расчета является диаметр штанги d_a и степень прессования древесины штанги k [4].

Ниже приводится пошаговая последовательность действий для достижения целей расчета. Определяется исходный диаметр штанги d_{uc} . Он равняется диаметру заготовки для изготовления штанги способом контурного прессования. Расчет ведется по известной формуле [4]:

$$d_{uc} = \frac{d_a}{(1-k)^{0,5}}, \quad (1)$$

где d_a - диаметр штанги, м;

d_{uc} - исходный диаметр штанги, м;

k – степень прессования древесины штанги в долях от первоначального размера, д.ед.

Рассчитывается исходная площадь поперечного сечения штанги:

$$S_{uc} = \frac{\pi d_{uc}^2}{4}, \quad (2)$$

где S_{uc} - исходная площадь поперечного сечения штанги, м².

Определяется расчетное сопротивление древесины, соответствующее режиму нагружения, уровню ответственности и условиям работы распорного анкера. Расчетное сопротивление определяется на основании методики, представленной в своде правил СП 64.13330.2011 [5] по формуле:

$$R^p = R^{ep} \times m_{dl} \times \gamma_{n(cc)} \times m_s \times m_n, \quad (3)$$

где R^p - расчетное сопротивление древесины штанги на растяжение вдоль волокон, Па;

$R^{вр}$ - временное сопротивление древесины сосны на растяжение вдоль волокон, Па;

$m_{дл}$ – коэффициент длительной прочности;

$\gamma_{н(сс)}$ – коэффициент надежности, учитывающий срок службы конструкции распорного анкера;

$m_{в}$ - коэффициент условий работы распорного анкера;

$m_{п}$ - переводной коэффициент для расчетных сопротивлений при переходе от древесины сосны на другую породу древесины.

Определяется прочность штанги на разрыв:

$$P_{р.а.} = S_{ис} \times R^p, \quad (4)$$

где – $P_{р.а.}$ – прочность штанги на разрыв, Н.

Рассчитываются силовые показатели распорной анкерной крепи. Расчет ведется на основании технических требований назначения к анкерным крепям, изложенным в ГОСТ 31559-2012 [2]. Несущая способность анкера $P_{н.а.}$ равняется усилию закрепления замка анкера в породах и определяется из соотношения установленного п. 5.1.2.5 [2].

$$P_{р.а.} = (1,3 \div 1,5)P_{н.а.}, \quad (5)$$

где $P_{н.а.}$ - несущая способность распорного анкера (усилие закрепления замка анкера в породах), Н.

Сопротивление распорного анкера при работе анкера в податливом режиме $P_{с.а.}$ определяется из соотношения установленного п. 5.1.2.2 [2].

$$P_{с.а.} = (0,7 \div 0,8)P_{н.а.}, \quad (6)$$

где $P_{с.а.}$ - сопротивление распорного анкера, Н.

Определяется рациональная длина замковой части распорного анкера. Основанием для ее расчета является ранее установленная эмпирическая зависимость удельного сцепления штанги распорного анкера со стенками шпура от степени прессования древесины штанги [3]. Зависимость имеет линейный характер и выражается формулой:

$$C = 10^6(3,5k + 0,48), \quad (7)$$

где C – удельное сцепление штанги со стенками шпура, Па.

Замок обеспечивает закрепление распорного анкера в породе с усилием, равным несущей способности анкера $P_{н.а.}$. Для этого должно выполняться следующее равенство:

$$P_{н.а.} = \pi d_a l_{з.а.} C, \quad (8)$$

где $l_{з.а.}$ - длина замка анкера, м.

Длина замка определяется по следующей формуле:

$$l_{з.а.} = \frac{P_{н.а.}}{\pi d_a C}. \quad (9)$$

В качестве примера определим силовые параметры и длину замка распорного анкера, штанга которого выполнена из древесины сосны 1 сорта, имеет степень прессования $k = 0,4$ и диаметр $d_a = 43$ мм.

$$d_{ис} = \frac{d_a}{(1 - k)^{0,5}} = \frac{43 \times 10^{-3}}{(1 - 0,4)^{0,5}} = 56 \times 10^{-3}, м$$

$$\begin{aligned}
S_{uc} &= \frac{\pi d_{uc}^2}{4} = \frac{3,14 \times (56^2 \times 10^{-6})}{4} = 2,46 \times 10^{-3}, \text{ м}^2, \\
R^p &= 34 \times 10^6 \text{ Па (таблица В.2 [5]);} \\
m_{ол} &= 0,92 \text{ (таблица В.1 [5]);} \\
m_g &= 0,75 \text{ (таблица 7 [5]);} \\
m_n &= 1,0 \text{ (приложение В [5]);} \\
\gamma_{н(сс)} &= 1,0 \text{ (таблица 12 [5]);} \\
R^p &= 34 \times 10^6 \times 0,92 \times 1,0 \times 0,75 \times 1,0 = 23,5 \times 10^6 \text{ Па.} \\
P_{p.a} &= S_{uc} R^p = 2,46 \times 10^{-3} \times 23,5 \times 10^6 = 57,8 \times 10^3 \text{ Па.} \\
P_{н.а.} &= \frac{P_{pa}}{1,3 \div 1,5} = \frac{57,8 \times 10^3}{1,4} = 41,3 \times 10^3, \text{ Н.} \\
P_{с.а} &= (0,7 \div 0,8) P_{н.а} = 0,75 \times 41,3 \times 10^3 = 31 \times 10^3, \text{ Н.} \\
C &= (3,5k + 0,48) 10^6 = (3,5 \times 0,4 + 0,48) \times 10^6 = 1,88 \times 10^6 \text{ Па} \\
l_{з.а.} &= \frac{P_{н.а.}}{\pi d_{a \times c}} = \frac{41,3 \times 10^3}{3,14 \times 43 \times 10^{-3} \times 1,88 \times 10^6} = 0,16 \text{ м.}
\end{aligned}$$

Выполненный расчет позволяет определить несущую способность и рабочее сопротивление рассматриваемого распорного анкера в размере 41 кН и 31 кН соответственно.

Выводы:

1. Представленный метод расчета позволяет определить силовые характеристики распорного анкера, выполненного из хвойных пород дерева, на основании сведений о типе и качестве древесины, диаметре штанги и степени ее прессования.
2. Основным ограничением силовых характеристик распорного анкера, таких как несущая способность и рабочее сопротивление, является прочность штанги на разрыв.
3. Возможности замка распорного анкера по усилию закрепления в породе превышают аналогичные показатели всех известных в горной промышленности конструкций анкерных крепей.
4. Несущая способность распорного анкера не мене 50 кН достигается при диаметре штанги более 48 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17.12.2013 г. № 610 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://i-risk.ru/upload/iblock/62e/Prikaz%20610.pdf>
2. ГОСТ 31559-2012 Крепи анкерные. Общие технические условия (с изменением №1). – М.: Стандартинформ, 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gost.donses.ru/Index/53/53724.htm>
3. Николаев Ю. И., Ефентьев Г. А. К вопросу создания распорных анкерных крепей для упрочнения трещиноватых обводненных и мерзлых пород // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 224–229.
4. Хухрянский П.Н. Прессование древесины/П.Н. Хухрянский.- М.: «Лесная промышленность», 1964.- с. 28-29.
5. СП64.1330.2011 «СНиП 11-25-80 Деревянные конструкции». - М.: 2011.-86 с.

© Г. А. Ефентьев, Ю. И. Николаев, 2017

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОМ ВИБРОВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
В НЕФТЕНАСЫЩЕННОМ ОБРАЗЦЕ**

Дмитрий Сергеевич Евстигнеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (983)127-88-52, e-mail: dima503@pochta.ru

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных по изучению фильтрационных процессов в отдельном геоблоке при низкочастотном виброволновом воздействии. По количественным данным объемов флюидов, прокачанных через пористый гидрофильный образец, построены регрессионные уравнения. Анализ полученных зависимостей позволил определить время прорыва водной фазы и количественно подсчитать дополнительный прирост дебита нефти при низкочастотном виброволновом воздействии. Показано образование капиллярно запертых целиковых зон в гидрофильном пористом образце.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, геоблок, виброволновое воздействие, целиковые зоны.

**STATISTICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA ON INVESTIGATION INTO
FILTRATION PROCESSES UNDER LOW-FREQUENCY VIBRATION-WAVE EFFECT
ON AN OIL-SATURATED SPECIMEN**

Dmitry S. Evstigneev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher of Mining Machinery and Geotechniques Research Center, tel. (983)127-88-52, e-mail: dima503@pochta.ru

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Mining Machinery and Geotechniques Research Center, tel. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

The results of statistical processing of experimental data on investigation into filtration processes in a discrete geoblock under low-frequency vibration-wave effect are reported. Regression equations are plotted based on quantitative data on fluid volumes pumped through a porous hydrophilic specimen. The analysis of the resultant relationships enabled to determine time of the water phase rupture and to evaluate quantitatively an oil yield increment under the low-frequency vibrowave effect. The formation of capillary-closed block zones in the hydrophilic porous specimen is demonstrated.

Key words: two-phase filtration, geoblock, vibrowave effect, pillar zones.

Мировые промышленные гиганты и энергетический комплекс требуют все больше топлива в виде нефти, угля, газа и поэтому сырьевые компании стремятся увеличить их добычу. Ученые всех стран признают, что нефтяные месторождения истощены, а потребление угля сильно ухудшает экологию Земли и отрицательно сказывается на биосфере. Для интенсификации добычи нефти на истощенных месторождениях человек искусственно вмешивается в процесс её извлечения, стремясь увеличить как качество, так и количество добываемого полезного ископаемого. Одним из перспективных методов такого воздействия является вибросейсмическое просвечивание нефтяной залежи поверхностными или скважинными виброисточниками, преимущество которого заключается в экономической рентабельности, эргономике применения механизмов и экологической чистоте.

Из блочно-иерархической концепции строения геосред, сформулированной М.А. Садовским и развитой В.Н. Опариним [1-4] следует, что терригенные коллекторы, в нефтяном пласте, расчленены на обособленные объемы (геоблоки) макротрещинами, в которых фильтрация флюида может происходить одновременно как по матрице породы блоков, так и по межблоковым трещинам (рис. 1) [4].

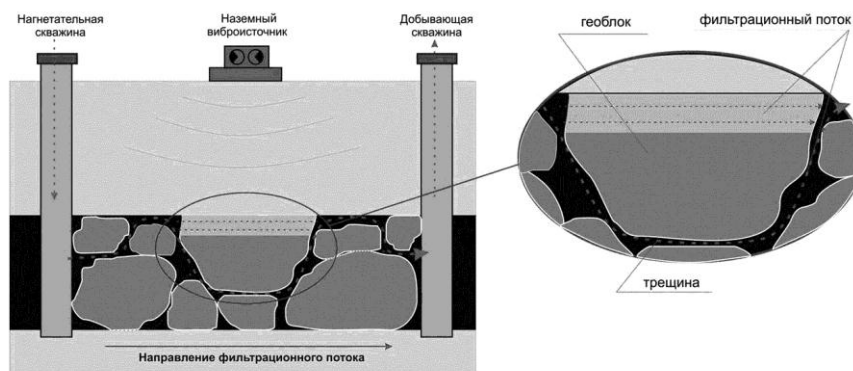


Рис. 1. Схема блочного строения нефтяного пласта

В блочной структуре нефтяного пласта рассмотрим отдельный геоблок произвольной формы окружённый по периметру лабиринтной трещиной (рис. 1). Будем предполагать, что по трещине движется преимущественно водная фаза, и, следовательно, давлению в водной фазе противостоит давление в капиллярах на границе геоблок-трещина. Капиллярное давление является функцией от нефтенасыщенности, и оно будет определять размеры целиковой зоны формирующейся в геоблоке после прорыва водной фазы.

Для проведения экспериментов по влиянию направленного низкочастотного виброволнового воздействия на процесс фильтрации в единичном блоке был подготовлен гидрофильный пористый образец в форме параллелепипеда, размеры которого 12х10,5х6,3 см, с размещенным в нём вибратором, в качестве которого был использован сейсмодатчик GMT-12.5 (собственная частота колебаний 12,5 Гц). По периметру образца организована лабиринтная трещина по которой движется вода, так как показано на рис. 2.

Пропитанный маслом, недорогим заменителем нефти, пористый образец помещён в специальную камеру, в которой организована лабиринтная трещина. На нагне-

тательной стороне образца действует гидростатическое давление $P_2=22540$ Па, а на эксплуатационной стороне через штуцер в мерную колбу при атмосферном давлении ($P_1=0$ Па) отбирается весь объем флюидов прошедший как через образец, так и по трещине. Фиксируется время, объем каждой из фаз и по полученным данным строятся графики временной зависимости объемов флюидов прокаченных через образец.

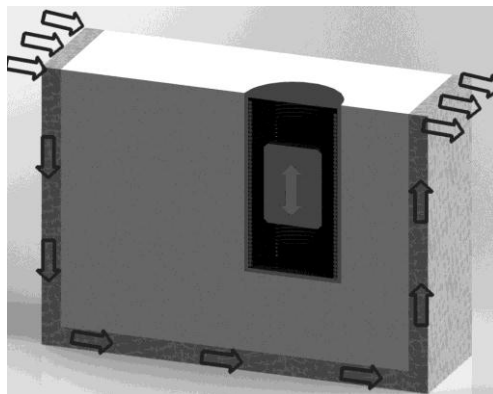


Рис. 2. Схема размещения вибратора внутри геоблока, обтекаемого водой

На рис. 3 сведены данные временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец по четырем экспериментам, которые условно можно разделить, по времени, на три группы.

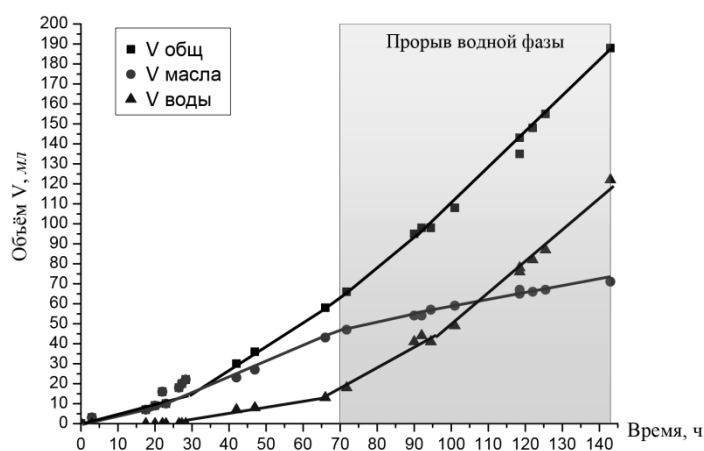


Рис. 3. Графики временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец (объединены результаты экспериментов, полученных на 4-х образцах)

К первой группе отнесем данные по регистрации объемов флюидов с 0 по 30 часов. За это время происходит вытеснение масла по трещине, окружающей геоблок. Поскольку плотность масла меньше плотности воды, то первым из выходного патрубка вытекает масло, а затем появляются следы воды. Осложняет процесс регистрации необходимость учета объем флюидов, требуемых для заполнения пространства трещины и патрубка. В этом временном промежутке кривая общего объема, прокаченного через образец с окружающей его трещиной, имеет изгиб. Поскольку интерес

представляет формирование целиковых зон в геоблоке, то на данном временном интервале, с учетом провиденных особенностей, эти данные по объемам в дальнейшем анализе рассматриваться не будут.

Ко второй группе отнесем данные по регистрации объемов флюидов с 30-го по 70-й час. В этом временном интервале идет фильтрация масла и воды в геоблоке, которая заканчивается прорывом водной фазы. Время прорыва предстоит определить из регрессионного анализа.

Наконец, к третьей группе относятся данные по регистрации объемов флюидов после прорыва водной фазы. Главным образом к этой группе будут относиться данные по регистрации объемов флюидов, полученные при активном вибровоздействии.

Построим линейные уравнения регрессии по эмпирическим данным для временного диапазона с 42-го по 72-й час, рис. 4.

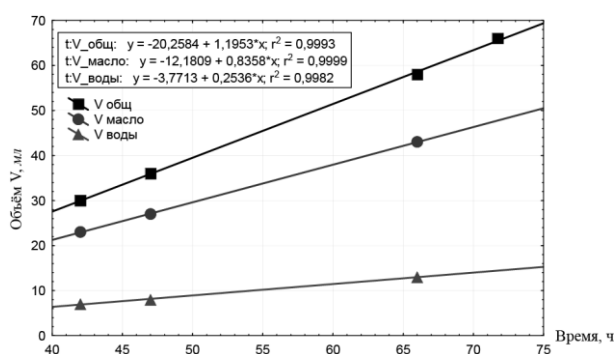


Рис. 4. Экспериментальные данные временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец и построенные по ним уравнения линейной регрессии

Коэффициенты детерминации r^2 во всех линейных регрессионных моделях близки к единице (рис. 4), т.е. в случае стационарной фильтрации объёмы флюидов прокачиваемые через систему геоблок-трещина линейно зависят от времени.

Для временного диапазона с 70-го по 142-й час коэффициенты детерминации r^2 в линейных регрессионных уравнениях составляют 0,97-0,986, рис. 5 (пунктирным линиям соответствует доверительный 95%-й интервал).

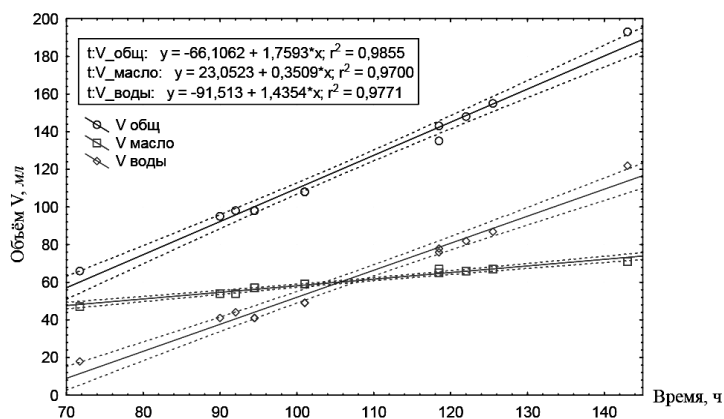


Рис. 5. Экспериментальные данные временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец и построенные по ним уравнения линейной регрессии

Объединяя два временных интервала на одном графике и строя соответствующие уравнения регрессий для каждого из интервалов, можно вычислить время прорыва водной фазы $t_{np}=70$ часов, рис. 6.

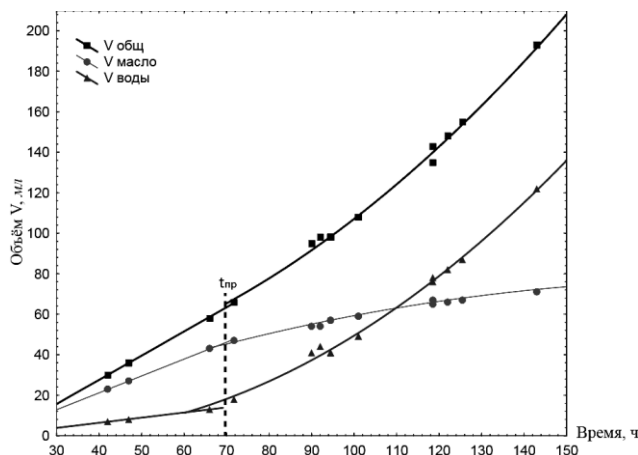


Рис. 6. Графики временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец с 30-го по 150-й час

В эксперименте без вибровоздействия прирост масла начиная с 66-го по 93-й час составил 7 мл или 0,26 мл/ч, причем с 90-го по 93-й час масло не вытеснялось вовсе, рис. 7. Сформировавшиеся целиковые зоны можно увидеть, распилив образец вдоль общего фильтрационного потока, так как показано на рис. 8 [5].

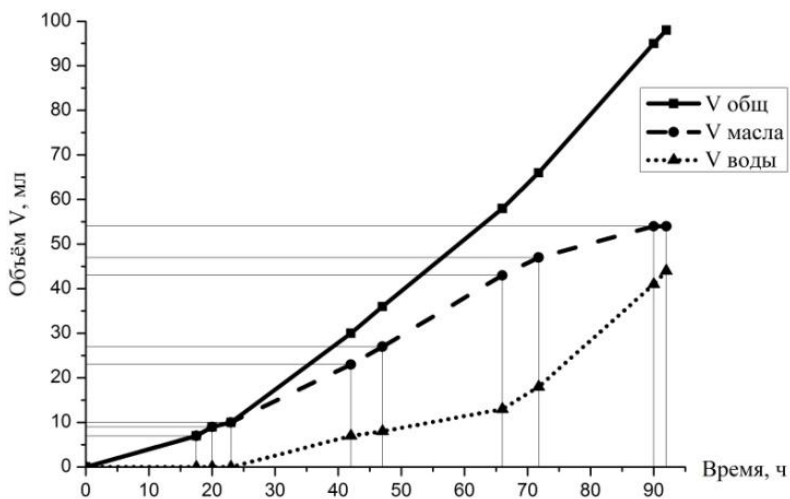


Рис. 7. Графики временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец без вибровоздействия

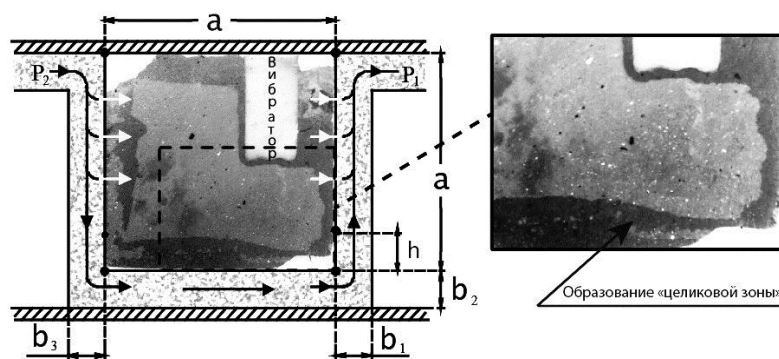


Рис. 8. Схема размещения образца в камере и результат распила после прорыва водной фазы. Светлый фон – водная фаза, тёмный – масло. (Всего масла в образце 177,45 г, добыто масла из образца 44,65 г, 74,8% масла осталось в образце, $h=11\div 15$ мм)

Закключение. Образующиеся в процессе вытеснения целики со временем уменьшаются в размерах и частично вовлекаются в поток. Направленное низкочастотное виброволновое воздействие способствует их наискорейшему разрушению и вовлечению в общий фильтрационный поток. На этапе вытеснения масла водой до момента прорыва из системы геоблок-трещина объемный расход вытесненного масла составил 0,84 мл/ч. После прорыва водной фазы, начиная с 70-го часа, при активном вибровоздействии объемный расход вытесненного масла составил уже 0,37 мл/ч, т.е. в 2,3 раза меньше. Без вибровоздействия объемный расход был равен 0,26 мл/ч. Таким образом вибровоздействие ускорило процесс вытеснения масла из геоблока на 0,11 мл/ч, т.е. прирост составил 42% в сравнении с экспериментом без вибровоздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 15-05-08824а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы. // ДАН СССР. Т. 247, №4. 1979. С. 829-833.
2. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г. Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. № 12. 1982. – С. 3-19.
3. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ, ИГД СО РАН. № 5. 1998. – С. 16-33.
4. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф. [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2010. 404 с.
5. Евстигнеев Д. С., Симонов Б. Ф., Савченко А. В. Экспериментальное исследование фильтрационных процессов при низкочастотном виброволновом воздействии в нефтенасыщенном образце // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 95–101.

© Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко, 2017

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ

Аркадий Васильевич Леонтьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383) 205-30-30, доп. 173 e-mail: leon@misd.ru

Татьяна Валентиновна Лобанова

Сибирский государственный индустриальный университет, научно-исследовательский центр «Геомеханика», 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, доктор технических наук, научный руководитель центра, тел. (3843)78-43-32, e-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru

Григорий Леонович Линдин

Сибирский государственный индустриальный университет, научно-исследовательский центр «Геомеханика», 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Сергей Александрович Лобанов

Сибирский государственный индустриальный университет, научно-исследовательский центр «Геомеханика», 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, научный сотрудник

Рассматриваются основы геомеханического обеспечения подземной отработки месторождений в геодинамически активном регионе. Основное внимание уделено параметрам процесса сдвижения и закономерностям деформирования охраняемых объектов промплощадок на подрабатываемых территориях.

Ключевые слова: сдвижения, тектонические коэффициенты, сейсмические события.

USING GEODYNAMIC MONITORING DATA TO ESTIMATE THE STRESS STATE OF MINE FIELDS

Arkady V. Leontiev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Leading Researcher, Mining Information Technique Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 173, e-mail: leon@misd.ru

Tat'yana V. Lobanova

Siberian State Industrial University, Geomechanics Research Center, 654007, Russia, Novokuznetsk, 42 Kirov St., D. Sc., Research Supervisor of Geomechanics Research Center, tel. (3843)78-43-32, e-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru

Grigory L. Lindin

Siberian State Industrial University, Geomechanics Research Center, 654007, Russia, Novokuznetsk, 42 Kirov St., Ph. D., Leading Researcher

Sergey A. Lobanov

Siberian State Industrial University, Geomechanics Research Center, 654007, Russia, Novokuznetsk, 42 Kirov St., Researcher

Geomechanical fundamentals of underground mining in a geodynamically active region are considered. The paper is focused on strata movement parameters and deformation regularities, specific for production sites under protection in territories disturbed by underground mining operations.

Key words: strata movement, tectonic factors, seismic events.

Определение действующих напряжений в массиве горных пород и оценки напряженности шахтных полей являются актуальными задачами, особенно на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Однако в настоящее время натурные определения напряжений производятся крайне редко, в том числе, и на месторождениях Горной Шории (Россия, юг Кемеровской области). В то же время, на Таштагольском месторождении, опасном по горным ударам, имеются данные мониторинга процессов сдвижения земной поверхности и горных пород, которые могут быть использованы для расчета напряжений и оценки их изменения во времени и в пространстве.

Расчет напряжений выполнен по результатам GPS-наблюдений на геодинамическом полигоне за сдвижением земной поверхности Таштагольского месторождения, проведенных в период 2005 – 2016 гг. Такие наблюдения выполнялись по два – три раза в год и были приурочены к массовым взрывам. Геодинамический полигон создан на базе наблюдательной станции за сдвижением земной поверхности месторождения [1]. Спутниковые наблюдения в этом полигоне и обработка результатов проводились по стандартным методикам. Измерения выполнялись независимо на каждом характерном пункте от двух базовых станций, расположенных за границами зоны влияния горных разработок.

При расчете напряжений через горизонтальные и вертикальные сдвижения реперов, расположенных по простиранию и вкрест простирания рудных тел месторождения, вычислены тектонические коэффициенты в этих направлениях w_1 и w_2 . Расчет выполнен по методике [2], использованной ранее для оценки напряжений в районе Шерегешевского месторождения. За исходные тектонические коэффициенты в момент образования выработанного пространства приняты коэффициенты тектонического поля напряжений, установленные исследованиями ВостНИГРИ [3]: $\sigma_1 = 3,0\sigma_3$; $\sigma_2 = 1,8\sigma_3$; $\sigma_3 = \gamma H$. Напряжения σ_1 и σ_2 являются горизонтальными. Азимут действия максимальных напряжений вне зоны влияния горных работ ориентирован по простиранию рудной зоны месторождения.

На рисунке представлены зависимости изменения во времени тектонических коэффициентов по простиранию и вкрест простирания месторождения, построенные по средним значениям в соответствующих направлениях.

Следует отметить хорошее соответствие изменения тектонических напряжений и энергии сейсмических событий, происходящих в районе месторождения и фиксируемых сейсмостанцией Таштагольского рудника. Рост энергии сейсмособытий наблюдается в периоды роста тектонических коэффициентов. При этом, если тектонический коэффициент вкрест простирания изменяется на уровне 0.5, то изменчивость тектонического коэффициента по простиранию в 2 раза больше и составляет около 1.0. Установлена стабилизация тектонического коэффициента вкрест простирания месторождения на уровне 1.7 в последние пять лет и коэффициента по простиранию на уровне 3.4 в последние два года, а также резкое возрастание последнего от 2.5 до 3.5 после проведения массовых взрывов. Это свидетельствует об активизации тектониче-

ских коэффициентов по простиранию и вкрест простирания месторождения, построенные по средним значениям в соответствующих направлениях.

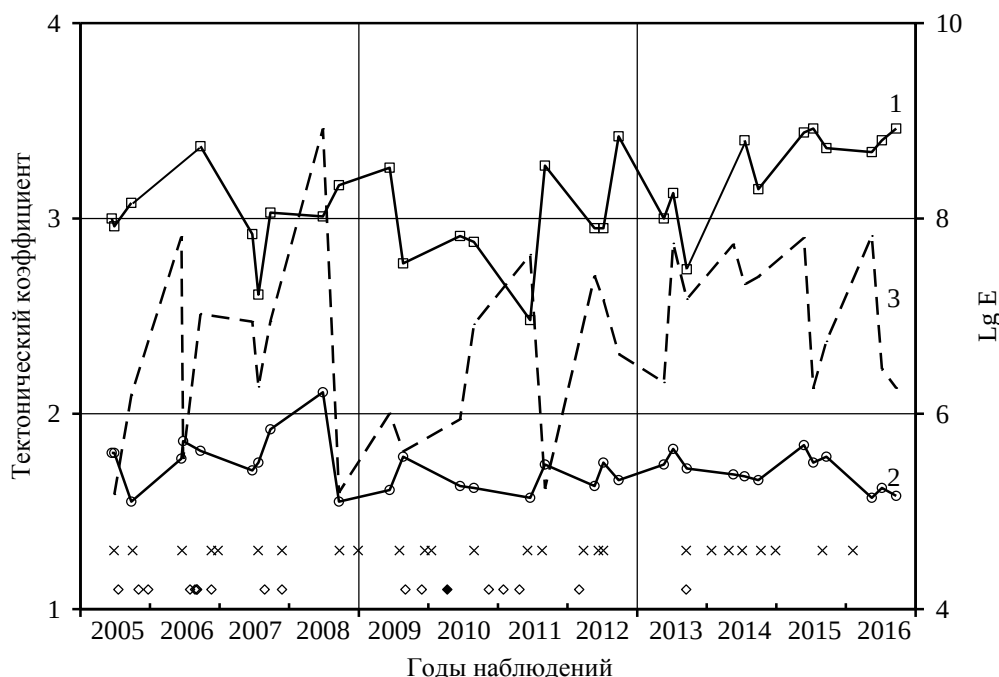


Рис. Изменение во времени напряженного состояния массива горных пород Таштагольского месторождения:

1, 2 – тектонический коэффициент соответственно по простиранию и вкрест простирания; 3 – энергия сейсмособытий; × – массовые взрывы; ◇ – МУ; ◆ – ГУ

Из 31 периода наблюдений 2005 – 2016 гг. можно отметить следующие характерные периоды изменения напряжений в районе месторождения:

- 14 периодов уменьшения (увеличения) напряжений по простиранию и увеличения (уменьшения) напряжений вкрест простирания месторождения, что отражает процессы перераспределения напряжений в шахтном поле;
- 10 периодов увеличения напряжений и по простиранию и вкрест простирания месторождения, что соответствует всестороннему сжатию массива и пригрузке района ведения горных работ Восточного участка;
- 7 периодов уменьшения напряжений и по простиранию и вкрест простирания месторождения, что соответствует разгрузке района ведения горных работ Восточного участка и пригрузке вмещающих боковых пород.

Выделяется 2 длительных периода пригрузки Восточного участка с 25.09.2005 по 23.09.2006 (3 периода наблюдений) и с 19.09.2008 по 12.06.2009 (2 периода наблюдений) и 1 длительный период разгрузки района ведения горных работ и пригрузки боковых пород с 16.06.2010 по 19.06.2011 (2 периода наблюдений). В соответствии с чем, в таблице эти периоды объединены и рассматривается всего 27 периодов: 14 периодов перераспределения напряжений и 13 периодов пригрузки или разгрузки месторождения.

Анализ изменения тектонических напряжений на Таштагольском месторождении в зависимости от проводимых массовых взрывов (МВ) и проявления сейсмособытий показал, что из 14 периодов перераспределения напряжений в шахтном поле эти процессы происходили после проведения массовых взрывов в 8 случаях на Восточном участке и в 4 случаях на Юго-Восточном участке. Это подтверждает вывод о том, что именно массовые взрывы приводят к перераспределению напряжений. Следует отметить, что в условиях такого напряженно-деформированного состояния массива на руднике произошло только 4 крупных сейсмособытия (3 микроудара (МУ) и 1 горный удар 10.04.2010) из 18, зафиксированных в период 2005 – 2016 гг. Наибольшее количество сейсмических событий это события 1 – 3 энергетического класса.

Таблица

Параметры геодинамических и технологических процессов
Таштагольского месторождения

Период наблюдений процесса	Всего событий, шт.	Количество событий, шт., по классам						Объем массива, тыс. м ³	Суммарная энергия, Дж	МВ, шт.	МУ, шт.
		1 – 3	4	5	6	7	8				
14.06.2005–28.06.2005	34	32	1	1	-	-	-	376 840	1.49×10^5	1	-
28.06.2005–25.09.2005	158	152	5	-	1	-	-	2 143 744	1.55×10^6	-	1
25.09.2005–23.09.2006	1371	1326	28	11	5	1	-	3 813 395	7.56×10^7	2	6
23.09.2006–22.06.2007	1532	1486	39	5	2	-	-	2 468 229	8.76×10^6	2	1
22.06.2007–24.07.2007	121	117	2	1	1	-	-	574 796	1.89×10^6	1	-
24.07.2007–26.06.2008	704	677	19	4	3	-	1	3 976 836	8.35×10^8	1	2
26.06.2008–19.09.2008	83	82	-	1	-	-	-	1 624 335	1.56×10^5	-	-
19.09.2008–12.06.2009	608	588	17	3	-	-	-	5 315 740	1.01×10^6	2	-
12.06.2009–21.08.2009	223	221	1	1	-	-	-	1 159 158	4.11×10^5	1	-
21.08.2009–16.06.2010	859	836	23	-	-	-	-	4 222 053	8.77×10^5	2	3
16.06.2010–19.06.2011	1768	1701	48	10	9	-	-	15 593 880	5.08×10^7	2	3
19.06.2011–05.09.2011	199	196	2	1	-	-	-	4 480 640	1.72×10^5	1	-
05.09.2011–22.05.2012	1191	1155	23	8	4	1	-	4 337 166	2.58×10^7	1	1
25.05.2012–07.07.2012	502	480	12	7	3	-	-	2 085 328	1.46×10^7	2	-
07.07.2012–25.09.2012	365	343	15	5	2	-	-	17 707 677	4.09×10^6	-	-
25.09.2012–21.05.2013	691	671	12	8	-	-	-	4 452 592	2.09×10^6	-	-
21.05.2013–09.07.2013	279	267	7	3	-	2	-	2 478 764	5.53×10^7	-	-
09.07.2013–18.09.2013	591	564	17	6	4	-	-	4 411 880	1.49×10^7	1	1
18.09.2013–20.05.2014	1227	1200	20	-	5	2	-	10 266 346	5.44×10^7	2	-
20.05.2014–18.07.2014	499	482	13	3	-	1	-	4 604 998	2.11×10^7	1	-
18.07.2014–29.09.2014	296	278	10	3	4	1	-	3 185 821	2.53×10^7	-	-
29.09.2014–26.05.2015	1557	1497	32	18	9	1	-	9 200 868	6.33×10^7	2	-
26.05.2015–14.07.2015	153	139	12	2	-	-	-	3 268 213	1.83×10^6	-	-
14.07.2015–21.09.2015	322	303	12	6	1	-	-	8 246 601	5.51×10^6	1	-
21.09.2015–16.05.2016	1481	1425	35	12	8	1	-	7 975 838	6.62×10^7	1	-
16.05.2016–08.07.2016	644	622	17	5	-	-	-	3 186 907	2.86×10^6	-	-
08.07.2016–21.09.2016	291	273	12	6	-	-	-	3 464 655	1.83×10^6	-	-

Наиболее опасным для горных разработок является состояние всестороннего сжатия массива, когда район ведения горных работ одновременно пригружен напряжениями, действующими как по простиранию, так и вкрест простирания месторождения. В эти периоды зафиксирована максимальная суммарная энергия проявившихся сейсмособытий и максимальная средняя энергия одного события, которые сопровождались проявлением 8 МУ из 18. Периоды всестороннего сжатия массива в районе ведения горных разработок отличаются ограниченным объемом проявления сейсмособытий, в отличие от периодов разгрузки района горных работ и пригрузки боковых пород или периодов перераспределения напряжений в пределах всего района месторождения, когда объем массива, в котором проявились сейсмособытия, возрастает в несколько раз. В тех случаях, если этого не происходит и сейсмособытия проявляются в ограниченном объеме в зоне влияния очистных работ, то они проявляются в форме микроударов, несмотря на уменьшение напряжений как по простиранию, так и вкрест простирания месторождения.

Распределение сейсмических событий в районе месторождения по характерным периодам соответственно всестороннего увеличения напряжений с 24.07.2007 по 26.06.2008 и всестороннего их уменьшения с 16.06.2010 по 19.06.2011 отчетливо показывает площади проявления этих событий. Если в 2007 – 2008 гг. толчки 3 класса и выше проявлялись в основном в районах ведения очистных работ, то в 2010 – 2011 гг. существенно увеличивается количество таких толчков за пределами влияния горных разработок. Толчки 3 – 6 класса проявлялись уже на расстоянии 1.5 – 2.0 км от очистных работ, особенно, в районах тектонических нарушений в висячем боку рудной зоны.

Проявление сейсмособытий в тектонических блоках, граничащих с отрабатываемыми участками, в условиях роста тектонических напряжений в них, в последующем приводит к перераспределению напряжений на другие участки массива или всестороннему сжатию района ведения горных работ. Эти процессы неоднократно наблюдались в период 2005 – 2016 гг. на геодинамическом полигоне на земной поверхности и периодически фиксируются по наблюдениям в горных выработках шахты.

Следует отметить, что наблюдаемые тектонические напряжения по простиранию Таштагольского месторождения, согласно экспериментальным исследованиям [4] (GPS-наблюдения, определение механизмов очагов землетрясений и геолого-геоморфологические исследования), являются следствием глобальных тектонических процессов, связанных с Индо-Евразийской коллизией, когда Индо-Австралийская плита надвигается в стык Евразийской тектонической плиты в направлении Ю – С со скоростью примерно 50 мм/год. По этой причине в точках Евразийской тектонической плиты возникают тектонические напряжения и сдвигения, приводящие к формированию и проявлению мощных землетрясений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонтьев А. В., Лобанова Т. В. Деформационный мониторинг движений породного массива на железорудных месторождениях Горной Шории // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 4. – С. 133–138.

2. Лобанова Т. В., Линдин Г. Л., Лобанов С.А. Оценка региональной напряженности Шерегешевского месторождения по величинам сдвижения земной поверхности // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – № 1. В 2 т., Т. 1. – С. 201–209.
3. Шрепп Б. В. Управление геомеханическими процессами при разработке мощных удароопасных железорудных месторождений изменением геометрии и формы выработанного пространства : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1996. – 48 с.
4. Леонтьев А. В., Лобацкая Р. М., Кучай О. А. Прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния Нижнеканского породного массива // Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / В.Н. Опарин и др.; отв. ред. Н.Н. Мельников; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела и др. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2012. – С. 331 – 366.

© А. В. Леонтьев, Т. В. Лобанова, Г. Л. Линдин, С. А. Лобанов, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ОБОБЩЕННОЙ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕТРОПОЛИТЕНА С ОДНОПУТНЫМ ТОННЕЛЕМ

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Разработана обобщенная расчетная модель для исследования сетевым методом воздухораспределения в вентиляционной системе метрополитена с однопутными тоннелями. Проведены расчеты воздухораспределения, дана оценка степени влияния на него топологии и величины аэродинамических сопротивлений участков вентиляционной сети.

Ключевые слова: метрополитен, однопутный тоннель, вентиляционная система, сетевая модель, топология, аэродинамическое сопротивление.

GENERALIZED NETWORK MODEL TO STUDY AIR DISTRIBUTION IN SUBWAY VENTILATION SYSTEM WITH ONE-TRACK TUNNEL

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Assistant Professor, Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

The generalized computing model is developed to investigate air distribution in subway ventilation system with single-track tunnels by a network method. Air distribution calculations are made, the effect of topology and aerodynamic resistance of ventilation network sections is assessed.

Key words: subway, one-track tunnel, ventilation system, network model, topology, aerodynamic resistance.

Тоннельная вентиляция является одним из основных элементов системы жизнеобеспечения метрополитенов. К ней предъявляются требования, нормируемые СП "Метрополитены" [1] как по созданию комфортных параметров воздушной среды, так и по обеспечению условий безопасной эвакуации при чрезвычайной ситуации. Для исследования воздухораспределения в сооружениях метрополитена (на примере Новосибирского) численным способом, была создана математическая сетевая модель вентиляционной системы, на основе проведенного обследования проектно-конструкторской документации строительных конструкций путей движения воздушных потоков на действующих объектах метрополитена. Для проверки соответствия проектных данных и параметров существующих сооружений проведены натурные обследования вентиляционных сооружений станций и перегонов. С учетом уточненных данных проведен расчет аэродинамических сопротивлений [2, 3] ветвей сети. Вентиляционная сеть метрополитена представляет собой связанную систему с существенным влиянием работающих вентиляторов на параметры воздушного потока в разных точках сети. Данная работа направлена на выявление наиболее значимых элементов, влияющих на воздухораспределение и режимы работы вентиляторов в сети.

Для получения общих закономерностей воздухораспределения, на основе схемы вентиляционной сети Новосибирского метрополитена, разработана обобщенная схема вентиляционной сети, состоящая из повторяющихся одинаковых блоков, таких как «станционные пешеходные пути», «станционная вентиляционная камера», «перегонная вентиляционная камера» и соединяющие их участки перегонных тоннелей (рис. 1). Величины аэродинамических сопротивлений участков этих блоков рассчитаны как усредненные значения для соответствующих участков вентиляционной сети станций и тоннелей Новосибирского метрополитена.

Рис. 1. Обобщенная расчетная схема вентиляционной системы линии метрополитена:

Использование обобщенной модели позволяет избежать влияния на воздухораспределение частных особенностей разных станций.

Типовая станционная вентиляционная камера оснащена двумя вентиляторами без диффузоров; пластинчатыми шумоглушителями строительного исполнения из шлакоблоков до и после вентиляторов; одиночным киоском; выход воздуха на пути осуществляется с обеих сторон платформы с прохождением части воздуха через подплатформенный канал. Основное сопротивление – выход из венткиоска, оно состав-

ляет до 0.003 кПа (пример: участок 401-2); выходы на пути: 0.01 для ближнего выхода и 0.013 для дальнего.

Типовая перегонная вентиляционная камера оснащена двумя вентиляторами без диффузоров; пластинчатыми шумоглушителями строительного исполнения из шлакоблоков до и после вентиляторов; одиночным киоском; выход воздуха на пути осуществляется на оба тоннеля раздельно из канала между путями. Основное сопротивление – выход из венткиоска, оно составляет до 0.003 кПа, выходы на пути – по 0.0025 кПа.

Типовые тоннели стандартные однопутные с обделкой из железобетонных тюбингов диаметром 5.1 м, пристанционная вентсбойка длиной 20 м, длина полуперегона 500 м.

Количество станций на линии 8 штук, это минимальное число для корректного учета взаимовлияния воздухораспределения на линии [4].

Линия метрополитена представлена в двух вариантах: полуоткрытая, у которой с одной стороны тупик, а с другой выход в атмосферу, и тупиковая, ограниченная с обеих сторон тупиками.

Режим работы вентиляции соответствует летнему режиму, принятому в Новосибирском метрополитене: станционные вентиляторы типа ВОМД-24 работают на вытяжку, по одному на венткамеру, второй вентилятор выключен, его шибер закрыт; перегонные вентиляторы отключены, их шиберные аппараты открыты, затворы гражданской обороны открыты.

Действие тоннельных вентиляторов смоделировано с использованием усредненной аэродинамической характеристики вентиляционных установок, полученных с использованием результатов натурных измерений. При этом сопротивление входных и выходных элементов учтено в аэродинамической характеристике установок, что позволило повысить точность расчетов и их соответствие реальному объекту. Эта характеристика описывается зависимостью:

$$P = -0.0488 \cdot Q^2 + 1.31 \cdot Q + 55,$$

где P – статическое давление, даПа; Q – расход воздуха, м³/с.

Использование статической характеристики обосновывается тем, что динамическая составляющая полного давления, развиваемого тоннельным вентилятором типа ВОМД-24, практически полностью теряется при выходе из вентилятора в нагнетательную часть вентиляционной камеры. Это связано с несовершенством выходных элементов вентилятора и отсутствием диффузора.

В качестве основного параметра воздухораспределения использован воздухообмен на платформе станции и его составляющие: воздух, приходящий из тоннеля и из пешеходных станционных путей.

На рис. 2 приведена накопительная диаграмма воздухообмена на станциях полуоткрытой линии. Видно, что расход воздуха растет при приближении к выходу в атмосферу расположенному за 8-ой станцией. Рост расхода осуществляется за счет поступлений из тоннеля, которые в два раза превышают такие же для 1-ой, тупиковой станции. При этом расходы вентиляторов на всей линии практически не меняются и находятся в диапазоне 45.7-45.9 м³/с.

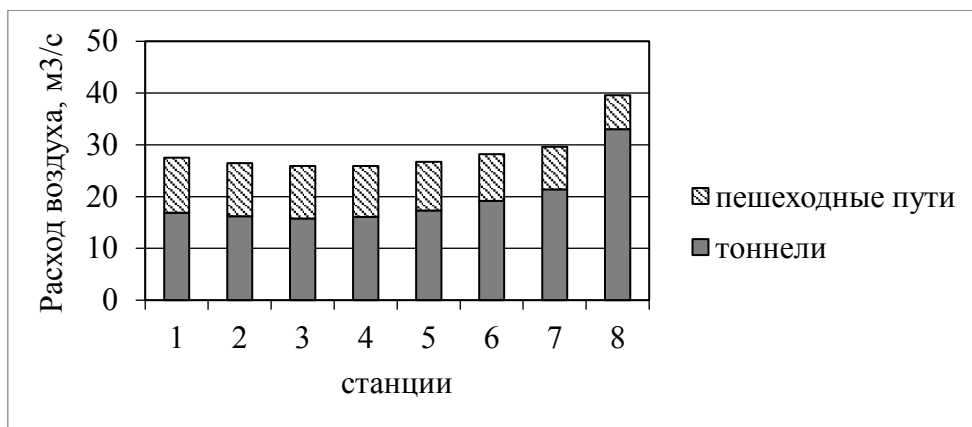


Рис. 2. Расходы воздуха, м³/с, через платформенный зал станции, полуоткрытая линия, выход в атмосферу на 8 станции

На рис. 3 приведена накопительная диаграмма воздухообмена на станциях тупиковой линии. Видно, что расходы воздуха на противоположных станциях примерно одинаковые (небольшое различие на счет несимметричности выходов воздуха на пути из станционных венткамер), на тупиковых расход больше за счет поступлений из тоннеля. Расходы вентиляторов на всей линии одинаковые и составляют 45.7 м³/с.

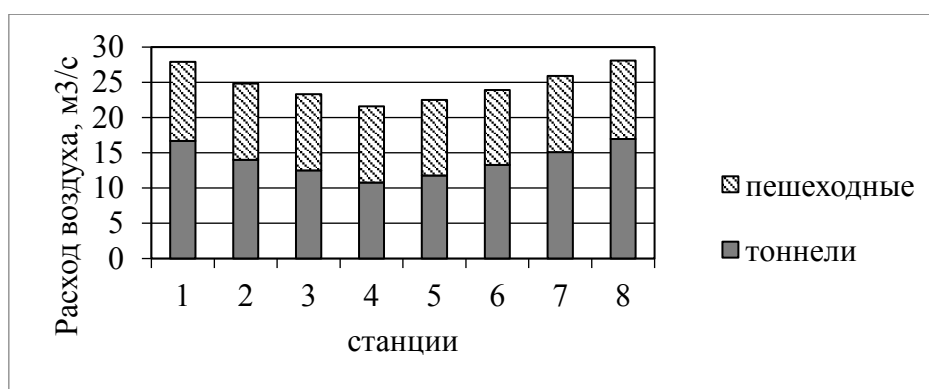


Рис. 3. Расходы воздуха, м³/с, через платформенный зал станции, тупиковая линия

Влияние изменения сопротивления участков блоков:

- при изменении сопротивления второго неработающего вентилятора в станционной венткамере с 0.666 до 150 кПа на полуоткрытой линии, расход на станциях вырос на 7-8% при том, что расход воздуха на вентиляторах остался в диапазоне 45.1-45.9 м³/с, т.е. изменился несущественно. Таким образом, снижение утечки через неработающий вентилятор позволяет существенно увеличить воздухообмен на станции без увеличения энергозатрат на проветривание.

- установка дополнительного ряда дверей увеличивает сопротивление участков с дверями с 0.03 до 0.06 кПа, при этом на полуоткрытой линии на 1-ой тупиковой станции расход снизился на 7.3%, а на 8-ой станции ближайшей к атмосфере, повысился на 9.1%. Производительность вентиляторов не изменилась и находится в диапазоне 45.6-45.9 м³/с.

– закрытие вестибюля на 4-ой станции (рис. 4) приводит существенному перераспределению воздухообмена на ближайших станциях: на 3-ей станции снижение на 13.5%, на 5-ой станции повышение на 16.1%. Производительность вентиляторов не изменилась и находится в диапазоне 45.7-45.9 м³/с.

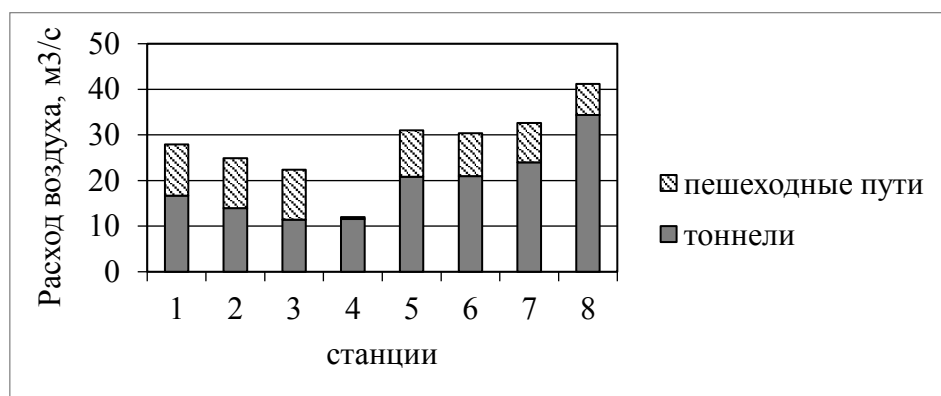


Рис. 4. Расходы воздуха, м³/с, через платформенный зал станции, полуоткрытая линия, закрыт вестибюль на 4-ой станции

Выводы:

Основные сопротивления линии метрополитена с двухпутным тоннелем: – двери на станциях; – венткиоски венткамер; – выходы в тоннель на станционных венткамерах.

Снижение утечек через неработающий вентилятор позволяет повысить воздухообмен на станциях на 7-8% без дополнительных энергозатрат.

Для полуоткрытой линии изменение сопротивлений пешеходных частей существенно влияет на режимы работы вентиляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 120.13330.2.12. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 260 с.
2. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Недра», 1975 г., 568 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям: монография. Под ред. М. О. Штейнберга.—3-е изд., перераб. и доп.—М.:Машиностроение, 1992.—672 с.
4. Красюк А.М., Лугин И.В. Взаимосвязность режимов вентиляции станций метрополитена// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2003. — № 4. — С. 199-203.

© И. В. Лугин, 2017

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ АДИАБАТИЧЕСКОГО УВЛАЖНЕНИЯ ТОННЕЛЬНОГО ВОЗДУХА КАК СПОСОБА НОРМАЛИЗАЦИИ МИКРОКЛИМАТА В СООРУЖЕНИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Елена Леонидовна Алферова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: alferova@mosk.ru

Рассмотрены способы охлаждения воздуха путем адиабатического увлажнения в двухпутном тоннеле метрополитена в теплый период года на примере Московского метро. Проведено сравнение эффективности адиабатного увлажнения воздуха в вентиляционной камере и при непосредственном распылении воды в тоннеле.

Ключевые слова: метрополитен, теплоизбытки, вентиляция, адиабатное увлажнение, охлаждение воздуха, оросительная камера.

ANALYSIS OF ADIABATIC TUNNEL AIR WETTING EFFICIENCY AS A WAY TO NORMALIZE MICROCLIMATE IN SUBWAY IN WARM SEASON PERIOD

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Assistant Professor, Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Elena L. Alferova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: alferova@mosk.ru

Processes for air cooling by adiabatic wetting of two-track subway tunnel in warm season period are considered in terms of Moscow subway. Performance of adiabatic air wetting in the ventilation chamber and the direct water pulverization in the subway tunnel is compared.

Key words: subway, heat excess, ventilation, adiabatic wetting, air cooling, water pulverization chamber.

Основной задачей тоннельной вентиляции является создание и поддержание требуемых параметров внутреннего воздуха в помещениях и сооружениях метрополитена. Допустимые требуемые параметры внутреннего воздуха в тоннеле достигаются и поддерживаются в теплый период года за счет компенсации выделяющихся теплоизбытков подачей наружного воздуха, количество которого определяются на основе сведения теплового баланса. В данной работе тепловыделения в тоннеле рассчитаны исходя из пассажиропотока и интервала движения поездов самой загруженной линии – Таганско-Краснопресненской [1]. Влаговыведения от пассажиров рас-

считаны в зависимости от пассажиропотока, для условий легкой работы, как наиболее приближенных к условиям метрополитена [2]. Расчетные тепло- и влаговыведения приведены на рис. 1.

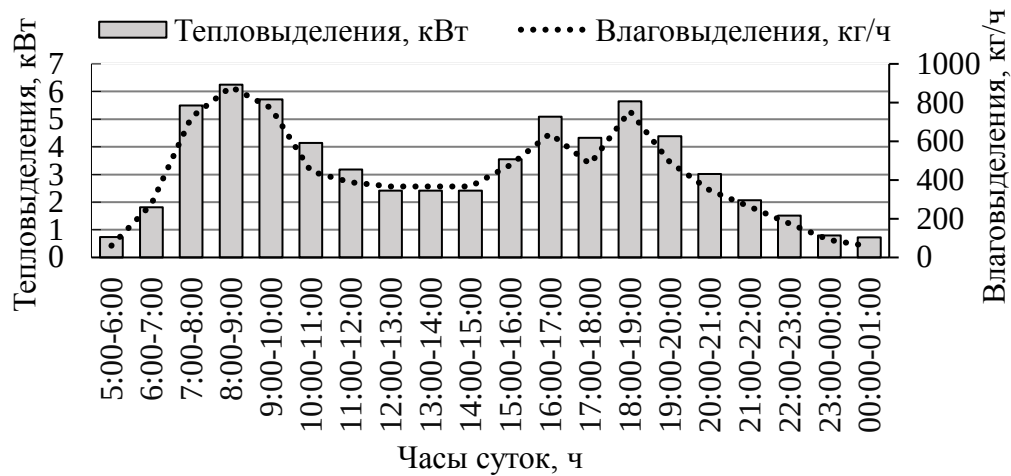


Рис. 1. Расчетные тепло- и влаговыведения в тоннеле в течение суток

Теплопотери в грунт рассчитаны на основе работ [3-4].

Все то тепло, что не ушло в грунт, требуется удалять средствами тоннельной вентиляции, то есть подавать необходимое для охлаждения тоннеля количество наружного воздуха. Количество наружного воздуха L ($\text{м}^3/\text{с}$), необходимое для выноса теплоизбытков Q_Σ , определяется по формуле:

$$L_{\text{тр}} = \frac{Q_\Sigma}{c \cdot (t_b - t_a) \cdot \rho_a},$$

где $c = 1.005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ – удельная теплоемкость воздуха; t_a – температура атмосферного воздуха, $^\circ\text{C}$ [5]; t_b – температура внутреннего воздуха, $^\circ\text{C}$ [6]; ρ_a – плотность атмосферного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При эксплуатации нерегулируемых вентиляторов, их производительность устанавливается среднесуточным расходом воздуха, который определяется по формуле:

$$L_{\text{ave}}^{\text{сут}} = \frac{Q_\Sigma^{\text{сут}}}{24c \cdot (t_b - t_a) \cdot \rho_{\text{ave}}},$$

где $Q_\Sigma^{\text{сут}}$ – суммарные теплоизбытки за сутки; ρ_{ave} – средняя за сутки плотность атмосферного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$. Для принятых условий требуемый среднесуточный расход воздуха составляет $166 \text{ м}^3/\text{с}$ для глубины заложения тоннеля 20 м. Однако, в часы пик при проветривании таким расходом воздуха, его температура в тоннеле будет превышать нормативные $+33 \text{ }^\circ\text{C}$.

Если же проветривать тоннель с дополнительным регулированием расхода воздуха – в часы пик увеличивать расход воздуха соответственно теплоизбыткам, то в данных условиях расчетные расходы воздуха по удалению теплоизбытков (рассчита-

ны с учетом суточного изменения температуры наружного воздуха и при температуре внутреннего воздуха $+33^{\circ}$) будут значительно превышать возможности оборудования тоннельной вентиляции (рис. 2). Так, например, требуемая производительность каждого подающего вентилятора при параллельной работе двух вентиляторов в промежуток времени между 16 и 17 часами составит $273 \text{ м}^3/\text{с}$ (при глубине заложения тоннеля 20 м).

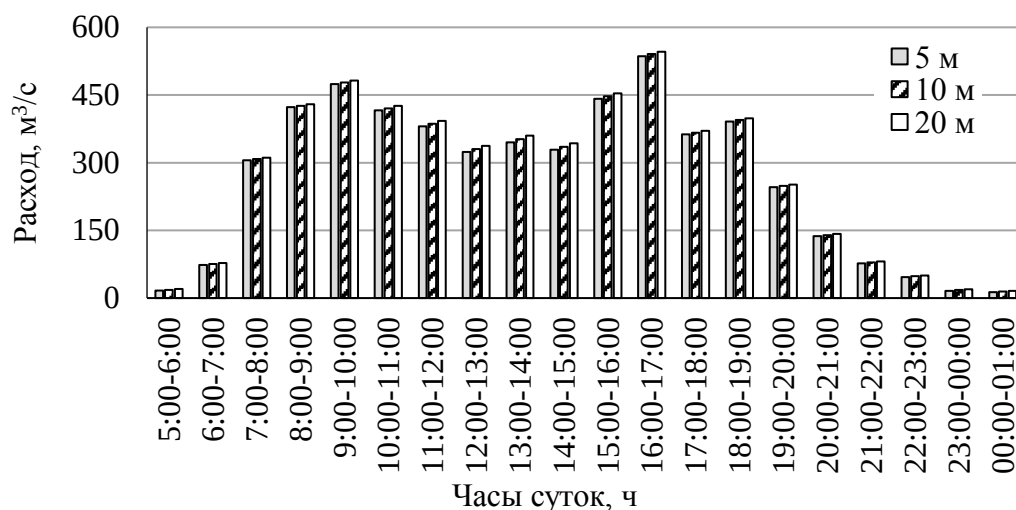


Рис. 2. Расход подаваемого в тоннель воздуха для выноса теплоизбытков в течение часового промежутка времени суток при различной глубине заложения двухпутного тоннеля

В теплый период для сокращения воздухообмена можно применять адиабатный способ охлаждения воздуха. Сущность этого способа заключается в том, что при разбрызгивании в камере орошения воды с температурой, равной температуре воздуха по мокрому термометру, движущийся по камере воздух взаимодействует с каплями воды и увлажняется испарившейся влагой до состояния близкого к насыщению. В условиях теоретического процесса при достижении полного насыщения воздуха влагой его конечная температура должна равняться температуре мокрого термометра, практически она будет несколько выше. Требуемый расход при этом будет рассчитываться по формуле:

$$L_{\text{тр}}^{\text{охл}} = \frac{Q_{\Sigma}}{c(t_{\text{в}} - t_{\text{м.т.}})\rho_{\text{м.т.}}},$$

где $t_{\text{м.т.}}$ и $\rho_{\text{м.т.}}$ – температура мокрого термометра, $^{\circ}\text{C}$, и соответствующая этой температуре плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

По известным изменениям параметров наружного воздуха рассчитано влияние адиабатического охлаждения наружного воздуха на снижение температуры удаляемого воздуха. Для теплого периода при среднегодовой относительной влажности 78 % [7] температура удаляемого воздуха снижается не менее, чем на 2°C . За расчетный принимается наиболее теплый месяц. Для него можно описать изменение суточное изме-

нение температуры и относительной влажности наружного воздуха: согласно [5], средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца составляет 73 %, средняя месячная относительная влажность воздуха в 15 часов наиболее теплого месяца составляет 60 %. Для расчетного месяца температура удаляемого воздуха при адиабатном охлаждении снижается на 5-6 °С. На рис. 3 на диаграмме Рамзина – Моляе показан процесс обработки воздуха в камере орошения. Точка Н – наружный воздух, с температурой t_H , соответствующей данному промежутку времени; О – воздух после камеры орошения, т.е. наружный воздух, охлажденный до температуры мокрого термометра $t_{м.т.}$; В – воздух, удаляемый из тоннеля (+33 °С).

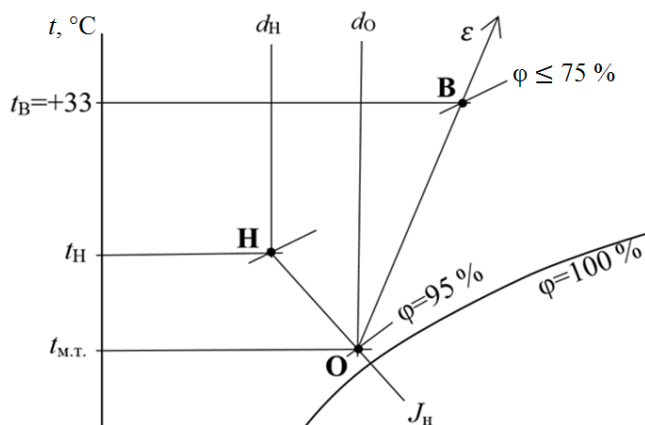


Рис. 3. Процесс обработки воздуха в камере орошения

Рассмотрим подробнее два различных способа охлаждения воздуха адиабатическим увлажнением.

1. Адиабатическое охлаждение в форсуночной (оросительной) камере: на рис. 4 изображена схема форсуночной камеры. Наружный воздух подается в оросительную камеру, в которой вода разбрызгивается под высоким давлением (для систем тоннельной вентиляции расход воды составит до 2650 т/ч, для форсунок типа УЦ 14-10/15 требуемое давление воды при таком расходе – 60 кПа), вступает в непосредственный контакт с поверхностью капель воды, распыляемой с помощью форсунок. Распыляясь, вода превращается в густой туман мелких капель, сквозь который движется воздух, поглощая водяные пары. Несомненным плюсом такого способа увлажнения воздуха является то, что вода, используемая для увлажнения, является рециркуляционной, т.е. вся та жидкость, что не ушла на увлажнение восполняется из холодильного центра до требуемого расхода и снова подается в форсуночный стояк для увлажнения, что снижает затраты на водоподготовку. Однако, потребуются дополнительные системы очистки приточного воздуха во избежание пылеосаждения в поддоне оросительной камеры.

2. Адиабатическое охлаждения воздуха непосредственно в тоннеле: на рис. 5 изображена схема расположения трубопровода. Наружный воздух подается в тоннель, вдоль которого внутри проложены трубопроводы с форсунками. В отличие от предыдущего способа, этот можно использовать не только для охлаждения воздуха, но также для борьбы с другой большой проблемой в метрополитене – пыленностью воздуха, и, помимо этого, можно объединить системы орошения и пожаротушения в

одну. Но в данном случае возрастут расходы на водоподготовку, металлоемкость, время монтажа и наладки системы орошения.

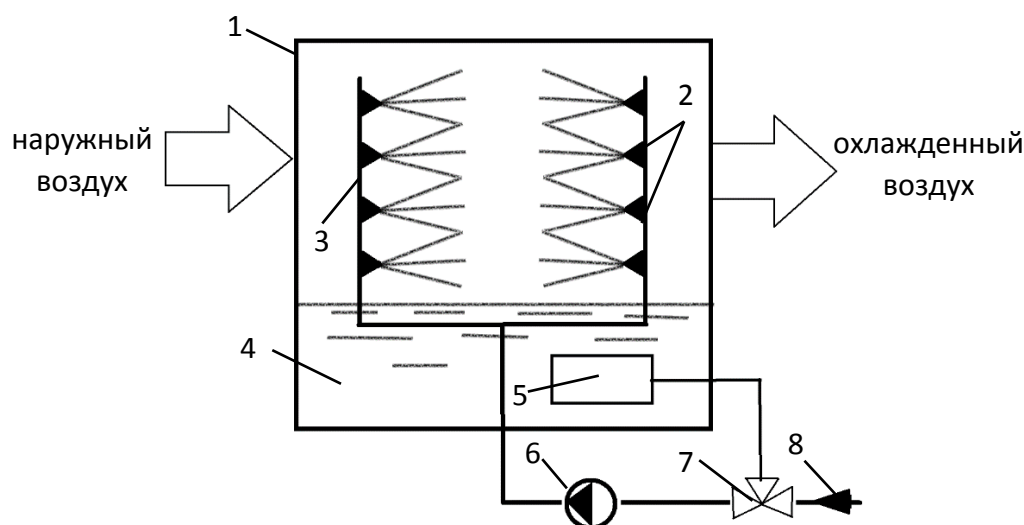


Рис. 4. Оросительная камера:

1 – корпус оросительной камеры; 2 – форсунки; 3 – стояк; 4 – поддон; 5 – фильтр;
6 – насос; 7 – вентили; 8 – трубопровод от центра охлаждения воды

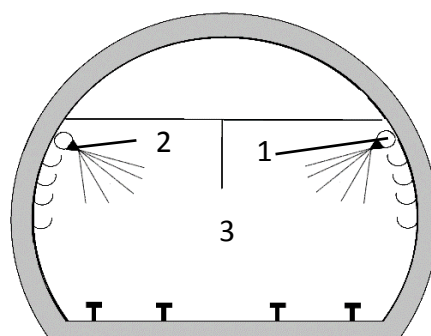


Рис. 5. Адиабатическое охлаждение воздуха в тоннеле:

1 – трубопровод охлажденной воды; 2 – форсунки; 3 – путевой отсек двухпутного тоннеля

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Московский метрополитен. Годовые отчеты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: old.mosmetro.ru/press/reports.
2. Павлов Н. Н. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1. – М.: Стройиздат, 1992. – 319 с.
3. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Влияние годовой цикличности изменения теплового потока в грунт на расчетный тепловой баланс двухпутного тоннеля метрополитена // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 191–196.

4. Красюк А.М. Экспериментальное исследование температуры обделок тоннеля и массива окружающего грунта в метрополитенах мелкого заложения / А.М. Красюк, И.В. Лугин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №3. С. 124-129.
5. СП 131.13330.2012. Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012.
6. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003.– Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012. – 267 с.
7. Погода и климат. Климат Москвы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/27612.htm> (дата обращения 25-12-2016).

© И. В. Лугин, Е. Л. Алферова, 2017

ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Елена Леонидовна Алферова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: alferova@mosk.ru

Рассмотрены схемы проветривания протяженных железнодорожных тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях Сибири и Дальнего востока, произведена классификация тоннелей по схемам проветривания. Составлена обобщенная расчетная сетевая схема для продольной схемы проветривания железнодорожных тоннелей с учетом различных источников давления.

Ключевые слова: железнодорожный тоннель, схема проветривания, штольня, естественная тяга, суровые климатические условия.

SPECIFIC AERATION PATTERN FOR EXTENDED RAILWAY TUNNELS IN SEVERE CLIMATE ENVIRONMENT

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Assistant Professor, Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Elena L. Alferova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: alferova@mosk.ru

Ventilation patterns for extended railway tunnels in severe climate environment of Siberia and Far East are considered. Tunnels are classified in terms of ventilation patterns. The researchers worked out the generalized computing network scheme for longitudinal aeration pattern for railway tunnels with allowance for different pressure sources.

Key words: railway tunnel, ventilation pattern, drift way, natural draught, severe climate environment.

В настоящее время, более десяти железнодорожных тоннелей проектируются и находятся на стадии строительства. Большая часть этих транспортных сооружений предназначена для эксплуатации в Сибири и на Дальнем Востоке. Территория Сибири характеризуется резко континентальным климатом – резкими перепадами температур, как суточных, так и сезонных. Сложные климатические условия эксплуатации усугубляются обводненностью окружающих тоннели грунтов и использованием тягового транспорта с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Учет всех этих факторов со-

здает сложность при проектировании вентиляционных систем железнодорожных тоннелей в условиях Сибири.

Согласно имеющейся классификации схемы проветривания железнодорожных тоннелей подразделяются на продольные и продольно-поперечные [1].

К объектам, для которых характерна продольная схема, относятся однопутные железнодорожные тоннели, где проветривание осуществляется за счет различного сочетания факторов: поршневого действия движущегося по ним транспорта, работы вентиляторов и естественной тяги. Вентиляторы могут располагаться на порталах или по длине тоннеля у кровли, у стен в пределах габарита приближения, или в специально сооруженных нишах [2]. Естественные (гравитационный, барометрический, ветровой напоры), эксплуатационные (поршневой эффект) и искусственные (вентиляционное оборудование) источника тяги в тоннеле могут действовать одновременно, усиливая или компенсируя действие друг друга. Это в одних случаях приводит к интенсификации воздухообмена, а в других к его уменьшению и даже к периодическому изменению направления движения воздуха [2].

Продольно-поперечная схема железнодорожных тоннелей характеризуется влиянием на продольную траекторию движения воздуха поперечных воздушных струй.

Для организации продольно-поперечной схемы проветривания в транспортных тоннелях могут использоваться специальные вентиляционные устройства [2], дополнительные выработки (штольни, служебные тоннели и т.п.), пройденные параллельно основному тоннелю и соединенные с ним сбойками, вертикальные или наклонные стволы, связанные с тоннелями подходными выработками или кроссингами. Например, для вентиляции подводного железнодорожного тоннеля под Ла-Маншем в качестве такой выработки служит специальный служебный тоннель, в который воздух подается через вертикальные стволы, расположенные на побережьях. Из служебного тоннеля воздух по сбойкам распределяется между эксплуатационными тоннелями, которые с целью снижения влияния поршневого действия поездов соединены специальными выработками (каналами) [2]. Таким образом, при общем направлении движения воздуха вдоль оси тоннелей происходит его циркуляция между выработками, соединяющими тоннели.

Применение продольно-поперечной схемы проветривания с использованием вертикальных стволов (шахт) в суровых климатических условиях России привело к большим неудобствам при ее эксплуатации.

Обследования систем вентиляции тоннелей Байкало-Амурской магистрали, выполненные сотрудниками Санкт-Петербургского горного института и Северобайкальской дистанции пути по обслуживанию тоннелей в 1985 – 1993 годах, показали, что в условиях сурового климата применение шахтной системы вентиляции приводит к обмерзанию ствола в зимний период и оттаиванию и обрушению наледей на дно ствола весной. Последнее затрудняет организацию проветривания тоннелей в этот период и приводит к необходимости удаления из тоннеля больших объемов воды.

Таким образом, область использования шахтных систем вентиляции железнодорожных тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях, при отсутствии подогрева воздуха ограничена лишь весенне-летне-осенним периодом, причем для тоннелей на дизельной тяге возникает необходимость дополнительного применения регулирующих устройств, способствующих выравниванию количеств воздуха по крыльям тоннеля (вентиляционные завесы, шиберы, ворота и т.п.) [3].

Наиболее сложным, по условиям эксплуатации, является Северомуйский тоннель, расположенный на Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Тоннель был сдан в эксплуатацию в 2003 году.

Длина железнодорожного тоннеля составляет 15,3 км. Параллельно ему имеется рабочая дренажная штольня, соединенная с тоннелем сбойками. Вентиляция сооружения осуществляется через порталы и четыре вентиляционных ствола. У восточного и западного порталов имеются здания с калориферными установками. В тоннеле имеются источники воды с содержанием радона. Концентрация радона в воздухе тоннеля в некоторых местах превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) в 1,5 раза. Концентрация радона в штольне, в некоторых местах, превышает ПДК в 2,5-3,5 раз. В период с ноября по март, в средней части тоннеля на протяжении 2000 м происходит обледенение внутренней обделки тоннеля, образуются сосульки и наледи на стенах и своде. Для поддержания безопасных условий прохождения составов, наледи и сосульки скалывают. Эти работы осуществляются обслуживающим персоналом вручную, что повышает эксплуатационные затраты.

Решение выше перечисленных проблем возможно путем совершенствования системы вентиляции. Для разработки математической модели вентиляционной сети необходима достоверная информация об аэродинамических сопротивлениях всех выработок и о расходах воздуха в характерных сечениях. На первом этапе работ была изучена техническая документация Северомуйского тоннеля. Проведен обзор имеющихся публикаций по вопросам системы вентиляции Северомуйского тоннеля. Выполнен анализ мониторинга по содержанию радона в атмосфере тоннеля и штольни. Сравнивая концентрации радона в воздухе подземных выработок ж/д тоннеля сделанных в 2008 г. и в 2011 г., можно заметить динамику изменений. На рис. 1, 2 приведены данные мониторинга в дренажной штольне.

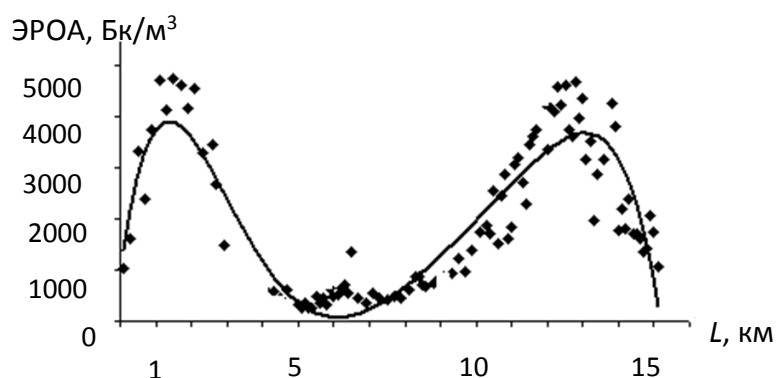


Рис. 1. Распределение ЭРОА радона по длине штольни, 2008 год

Сравнивая графики распределения ЭРОА по длине штольни в 2008 и 2011 годах, прослеживаются увеличение концентрации радона к середине тоннеля, преимущественно, у подземных выработок вблизи второго ствола.

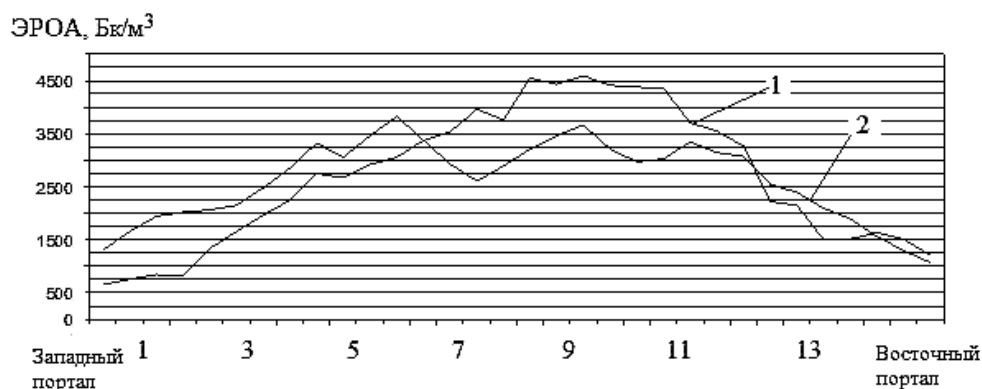


Рис. 2. Распределение ЭРОА радона по длине штольни, 2011 год:

- 1 – содержание радона в воздухе тоннеля при отключенной системе вентиляции тоннеля;
 2 – содержание радона в воздухе тоннеля при включенной системе вентиляции тоннеля

Анализ информации о водопритоках от источников с проявлениями радона в тоннеле и штольне также показал существенную неравномерность расходов. Максимальный водоприток на западном портале в 2008 году составил 6080 м³/ч, а в 2011 году – 5400 м³/ч. На восточном портале в 2008 году водоприток был 8460 м³/ч, в 2011 году 9700 м³/ч.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фомичев В. И. Вентиляция тоннелей и подземных сооружений. – Л.: Стройиздат, 1991.– 200 с.
2. Отчёт по договору №2620 от 01.08.2008 г. «Разработка рекомендаций по выбору схем вентиляции и определению их параметров при строительстве и эксплуатации Кузнецовского железнодорожного тоннеля. Этап III. Выбор и определение параметров вентиляционного оборудования для выбранной схемы проветривания и разработка рекомендаций по проектированию АСУ ТП в части контроля и управления состоянием воздушной среды». СПб. Фонды ОАО «ЛМГТ», 2010.
3. Федеральный закон 123. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изменениями на 3 июля 2016 года). – Одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года. – Москва: [б.и.], 2016.

© И. В. Лугин, Е. Л. Алферова, 2017

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ КЛИНОВИДНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Валерий Егорович Миренков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 187, e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Валерий Алексеевич Шутов

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусства, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, доктор технических наук, профессор, тел. (913)896-74-66, e-mail: va_shutov@mail.ru

Все известные решения для областей с угловыми точками некорректны, поскольку допускают большие деформации, т. е. не имеют ни математического, ни физического смысла. Предложен метод, исключаящий некорректность.

Ключевые слова: угловые точки, решение, уравнения, граничные условия, некорректность, бесконечность.

METHOD TO SOLVE THE WEDGE-SHAPED DOMAIN PROBLEMS

Valery E. Mirenkov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Professor, Principal Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 187, e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Valery A. Shutov

Novosibirsk State University of Architecture, Design, and Arts, 630091, Russia, Novosibirsk, 38 Krasny prospect, D. Sc., Professor, tel. (913)896-74-66, e-mail: va_shutov@mail.ru

All the known solutions for domains with corner points are not correct for considerable deformation tolerances, viz., these solutions have neither mathematical nor physical significance. The method eliminating the above incorrectness is proposed.

Key words: corner points, solution, equations, boundary conditions, incorrectness, infinity.

Классические формулировки задач теории упругости для областей, содержащих угловые точки, приводят к бесконечным напряжениям, что нарушает условие малости деформации в окрестности сингулярных точек. Все такие задачи некорректны, а следовательно не имеют ни математического, ни физического смысла [1-3]. Будем стремиться «освободить» угловую точку, не ограничивать ее перемещения и уже после этого применять аппарат линейной теории. Классическая модель не предоставляет такой возможности, а поэтому плохо моделирует явление в наиболее интересном месте – окрестности угловой точки [1,2]. Проникновение материала в материал, допускаемое классическими решениями в силу неопределенности, указывает на необходимость дополнительной формулировки, описывающей некий аналог контактной задачи типа Герца, но с более сложной постановкой, не встречаемой в практике теории упругости. Осуществить математическое моделирование такого эффекта можно по-

разному, с той или иной степенью точности, естественно за счет существенного усложнения аппарата реализации идеи. Освобождение от связей, позволяющее угловой точке свободно смещаться под действием внешних усилий в рамках теории упругости, можно осуществить задавая на малом участке в окрестности вершины нормальные и касательные усилия, моделирующие эффект контактной задачи, т.е. эквивалентные усилиям и моменту действующих на угловую точку в классическом решении. Другими словами, модель не должна чувствовать угловые точки за счет формулировки дополнительных условий, которые в рамках малых деформаций обеспечивают свободу смещений угловой точки.

Для моделирования областей с угловыми точками воспользуемся методом решения задачи о плоскости, ослабленной полигональным отверстием. В данном случае достаточно продолжить стороны клиновидной области и рассматривать выделенные таким образом две полуплоскости I и II (рис.1). Граничные условия обеспечивают равенство нулю главного вектора и главного момента, и только такие формулировки предполагаются ниже, так как все другие не имеют смысла в рамках теории упругости.

Обозначим через p_1, q_1 и p_2, q_2 соответственно нормальные и касательные усилия на продолжениях граней клиновидной области (рис.1).

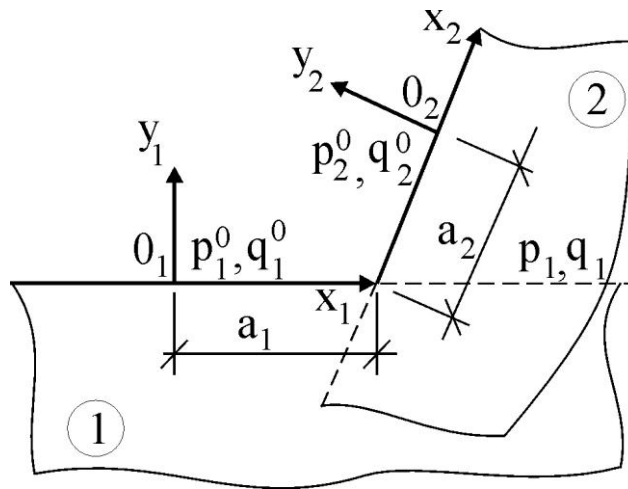


Рис. 1. Расчетная схема клиновидной области

Если считать p_1, q_1 известными, то решение для полуплоскости I выписывается через p_1^0, q_1^0 и p_1 всюду в полуплоскости вплоть до точек границы в виде [3]:

$$\begin{aligned}\sigma_{x1} &= 2\operatorname{Re}\Phi_1(z_1) - \operatorname{Re}[z_1\overline{\Phi_1'(z_1)} + \overline{\Psi_1(z_1)}], \\ \sigma_{y1} &= 2\operatorname{Re}\Phi_1(z_1) + \operatorname{Re}[z_1\overline{\Phi_1'(z_1)} + \overline{\Psi_1(z_1)}], \\ \tau_1 &= \operatorname{Im}[z_1\overline{\Phi_1'(z_1)} + \overline{\Psi_1(z_1)}],\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$\Phi_1(z_1) = -\frac{1}{2\pi i} \left[\int_{-\infty}^a \frac{p_1^0 - iq_1^0}{t - z_1} dt + \int_a^{\infty} \frac{p_1(t) - iq_1(t)}{t - z_1} dt \right],$$

$$\begin{aligned}\Psi_1(z_1) &= -\frac{1}{2\pi i} \left[\int_{-\infty}^a \frac{p_1^0 + iq_1^0}{t - z_0} dt + \int_a^{\infty} \frac{p_1(t) + iq_1(t)}{t - z_1} dt \right] - \\ \Psi_1(z_1) &= -\frac{1}{2\pi i} \left[\int_{-\infty}^a \frac{p_1^0 + iq_1^0}{t - z_0} dt + \int_a^{\infty} \frac{p_1(t) + iq_1(t)}{t - z_1} dt \right] - \\ &\quad - \Phi_1(z_1) - z_1 \Phi_1'(z_1).\end{aligned}\quad (2)$$

Для точек части границы второй полуплоскости, лежащих в первой, с помощью (1) определяем нормальные и касательные напряжения

$$\begin{aligned}\sigma_{n1} &= \sigma_{n1}(\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \tau_1), \\ \tau_{n1} &= \tau_{n1}(\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \tau_1).\end{aligned}\quad (3)$$

В то же время

$$p_2 = \sigma_{n1}(\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \tau_1), \quad q_2 = \tau_{n1}(\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \tau_1). \quad (4)$$

Совершенно аналогично, рассматривая вторую полуплоскость, получим

$$\begin{aligned}p_1 &= \sigma_{n2}(\sigma_{x2}, \sigma_{y2}, \tau_2), \\ q_1 &= \tau_{n2}(\sigma_{x2}, \sigma_{y2}, \tau_2).\end{aligned}\quad (5)$$

С учетом формулы перехода от системы координат x_1, y_1 к x_2, y_2 [1]:

$$z_2 = (z_1 - z_0) \cdot \exp(-i \cdot \alpha), \quad (6)$$

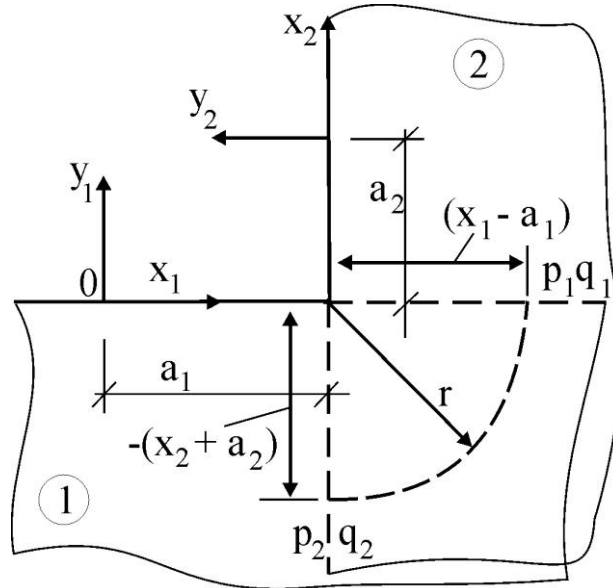
где z_0 – положение начала координат второй системы относительно первой, α – угол поворота системы z_2 относительно z_1 , можно переписать (3), (4) в системе координат z_1 . Если в полученных выражениях опустить индекс единица, то придем к системе четырех уравнений относительно неизвестных функций $p_1(x), q_1(x), p_2(x), q_2(x)$.

$$\begin{aligned}p_1 &= \sigma_{x2}(p_2, q_2; p_2^0, q_2^0) \sin^2 \alpha + \sigma_{y2}(p_2, q_2; p_2^0, q_2^0) \cos^2 \alpha + \\ &\quad + \tau_2(p_2, q_2; p_2^0, q_2^0) \sin 2\alpha, \\ q_1 &= \frac{1}{2} [\sigma_{x2}(p_2, q_2; p_2^0, q_2^0) - \sigma_{y2}(p_2, q_2; p_2^0, q_2^0)] \sin 2\alpha + \\ &\quad + \tau_2(p_2, q_2; p_2^0, q_2^0) \cos 2\alpha, \\ p_2 &= \sigma_{x1}(p_1, q_1; p_1^0, q_1^0) \sin^2 \alpha + \sigma_{y1}(p_1, q_1; p_1^0, q_1^0) \cos^2 \alpha - \\ &\quad - \tau_1(p_1, q_1; p_1^0, q_1^0) \sin 2\alpha, \\ q_2 &= \frac{1}{2} [\sigma_{y1}(p_1, q_1; p_1^0, q_1^0) - \sigma_{x1}(p_1, q_1; p_1^0, q_1^0)] \sin 2\alpha +\end{aligned}\quad (7)$$

$$+ \tau_1(p_1, q_1; p_1^0, q_1^0) \cos 2\alpha. \quad (8)$$

Подставляя выражения (1), с учетом (2), в правые части (7), (8), получим систему четырех интегральных уравнений для определения искомых функций p_1, q_1, p_2, q_2 .

Рассмотрим частную задачу сформулированного выше класса, т.е. представим систему (7), (8) в развернутом виде для случая клиновидной области с углом раствора $3\pi/2$ (рис.2).



$$x_1 = a_1 - y_2, \quad y_1 = a_2 + x_2$$

Рис. 2. Расчетная схема

Перепишем вначале систему (7), (8) в виде

$$p_1(x_1, 0) = \sigma_{x_2}(-a_2, a_1 - x_1),$$

$$q_1(x_1, 0) = -\tau_2(-a_2, a_1 - x_1),$$

$$p_2(a_1 - a_2 - x_1, 0) = \sigma_{x_1}(a_1, a_1 - x_1),$$

$$q_2(a_1 - a_2 - x_1, 0) = \tau_1(a_1, a_1 - x_1).$$

(9)

Для полуплоскости I, учитывая (1)–(8), получим

$$p_2(a_1 - a_2 - x_1) = \sigma_{x_1}(a_1, a_1 - x) =$$

$$= -\frac{2}{\pi} \left\{ (a_1 - x_1) \left[\int_{a_1}^{\infty} (t - a_1) K_{11} P_1(t) dt + \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_1) K_{11} p_1^0(t) dt \right] - \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{a_1}^{\infty} (t - a_1)^2 K_{11} q_1(t) dt - \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_1)^2 K_{11} q_1^0(t) dt \Big\}, \\
& - q_2(a_1 - a_2 - x_1, 0) = \tau_1(a_1, a_1 - x_1) = \\
& = \frac{2(x_1 - a_1)}{\pi} \left\{ (x_1 - a_1) \left[\int_{a_1}^{\infty} K_{11} P_1(t) dt + \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_1) K_{11} p_1^0(t) dt \right] + \right. \\
& \left. + \int_{a_1}^{\infty} (t - a_1) K_{11} q_1(t) dt + \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_1) K_{11} q_1^0(t) dt \right\}. \tag{10}
\end{aligned}$$

Для полуплоскости II

$$\begin{aligned}
& p_1(x_1, 0) = \sigma_{x_2}(-a_2, a_1 - x_1) = \\
& = -\frac{2}{\pi} \left\{ (a_1 - x_1) \left[\int_{-\infty}^{a_2} (t + a_2) K_{22} P_2(t) dt + \int_{a_2}^{\infty} (t + a_2) K_{22} p_2^0(t) dt \right] - \right. \\
& \left. - \int_{-\infty}^{a_2} (t + a_2)^2 K_{22} q_2(t) dt - \int_{a_2}^{\infty} (t + a_2)^2 K_{22} q_2^0(t) dt \right\}, \\
& q_1(x_1, 0) = \tau_2(-a_2, a_1 - x_1) = \\
& = -\frac{2(x_1 - a_1)}{\pi} \left\{ (x_1 - a_1) \left[\int_{-\infty}^{a_2} K_{22} P_2(t) dt + \int_{a_2}^{\infty} K_{22} p_2^0(t) dt \right] + \right. \\
& \left. + \int_{-\infty}^{a_2} (t + a_2) K_{22} q_2(t) dt + \int_{a_2}^{\infty} (t + a_2) K_{22} q_2^0(t) dt \right\}. \tag{11}
\end{aligned}$$

Здесь и в (10)

$$\begin{aligned}
K_{11} &= \frac{t - a_1}{[(t - a_1)^2 + (x_1 - a_1)^2]^2}, \\
K_{22} &= \frac{t + a_2}{[(t + a_2)^2 + (x_1 - a_1)^2]^2}.
\end{aligned}$$

Перепишем (10), (11) в виде

$$p_2(x_1) - \int_{a_1}^{\infty} L_1 p_1(t) dt - \int_{a_1}^{\infty} L_2 q_2(t) dt = f_1(x_1),$$

$$\begin{aligned}
q_2(x_1) - \int_{a_1}^{\infty} L_3 p_1(t) dt - \int_{a_1}^{\infty} L_4 q_1(t) dt &= f_2(x_1), \\
p_1(x_1) - \int_{a_2}^{\infty} L_5 p_2(t) dt - \int_{a_2}^{\infty} L_6 q_2(t) dt &= f_3(x_1), \\
q_1(x_1) - \int_{a_2}^{\infty} L_7 p_2(t) dt - \int_{a_2}^{\infty} L_8 q_2(t) dt &= f_4(x_1),
\end{aligned} \tag{12}$$

где

$$f_1(x_1) = \frac{2}{\pi}(x_1 - a_1) \int_{-\infty}^{a_1} K_{11} p_1^0(t) dt +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_1)^2 K_{11} q_1^0(t) dt,$$

$$f_2(x_1) = \frac{2}{\pi}(x_1 - a_1) \int_{-\infty}^{a_1} K_{11} p_1^0(t) dt +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_1)^2 K_{11} q_1^0(t) dt,$$

$$f_3(x_1) = \frac{2}{\pi}(x_1 - a_1) \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_2) K_{11} p_1^0(t) dt +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{a_1} (t - a_2)^2 K_{11} q_1^0(t) dt,$$

$$f_4(x_1) = \frac{2}{\pi}(x_1 - a_1) \int_{-\infty}^{a_2} K_{22} p_2^0(t) dt +$$

$$+ \frac{2}{\pi}(x_1 - a_1) \int_{-\infty}^{a_2} (t + a_2) K_{22} q_2^0(t) dt,$$

$$L_1(t, x_1) = 2/\pi \cdot (x_1 - a_1) \cdot (t - a_1) \cdot K_{11}, \quad L_2(t, x_1) = 2/\pi \cdot (t - a_1)^2 \cdot K_{11},$$

$$L_3(t, x_1) = -2/\pi \cdot (x_1 - a_1)^2 \cdot K_{11}, \quad L_4(t, x_1) = -2/\pi \cdot (x_1 - a_1) \cdot (t - a_1) \cdot K_{11},$$

$$L_5(t, x_1) = 2/\pi \cdot (x_1 - a_1) \cdot (t + a_2) \cdot K_{22}, \quad L_6(t, x) = 2/\pi \cdot (t + a_2)^2 \cdot K_{22},$$

$$L_7(t, x_1) = 2/\pi \cdot (x_1 - a_1)^2 \cdot K_{22}, \quad L_8(t, x_1) = 2/\pi \cdot (x_1 - a_1)(t + a_2) \cdot K_{22}.$$

В случае граничных условий, обеспечивающих симметрию деформирования клиновидной области, уравнения (10), (11) тождественны, и можно воспользоваться любой из этих систем для нахождения двух неизвестных функций, полагая $p_1=p_2=p$, $q_1=q_2=q$. Для частного случая клиновидной области с углом раствора $3\pi/2$, если положить $x_1=x$ и $a_1=a_2=a$, указанная система имеет вид

$$p(x) - \frac{2(x-a)}{\pi} \cdot \int_a^\infty K_1(t,x)p(t)dt - \frac{2}{\pi} \int_a^\infty K_2(t,x) \cdot q(t)dt = f_1(t), \quad (13)$$

$$q(x) - \frac{2(x-a)^2}{\pi} \cdot \int_a^\infty K_3(t,x)p(t)dt - \frac{2(x-a)}{\pi} \int_a^\infty K_4(t,x) \cdot q(t)dt = f_2(t),$$

где

$$K_1(x,t) = \frac{(t+a)^2}{[(t+a)^2 + (x-a)^2]^2} + \frac{(t-a)^2}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2},$$

$$K_2(x,t) = \frac{(t+a)^3}{[(t+a)^2 + (x-a)^2]^2} + \frac{(t-a)^3}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2},$$

$$K_3(x,t) = -\frac{t+a}{[(t+a)^2 + (x-a)^2]^2} + \frac{t-a}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2},$$

$$K_4(x,t) = \frac{(t+a)^2}{[(t+a)^2 + (x-a)^2]^2} + \frac{(t-a)^2}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2},$$

$$f_1(x) = \frac{2}{\pi} \cdot (x-a) \int_{-a}^a (t-a)K_{11}p^0(t)dt + \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a (t-a)^2 K_{11} \cdot q^0(t)dt,$$

$$f_2(x) = \frac{2}{\pi} \cdot (x-a) \int_{-a}^a K_{11}p^0(t)dt + \frac{2}{\pi} (x-a) \int_{-a}^a (t-a)K_{11} \cdot q^0(t)dt.$$

Форма представления (13) предполагает возможность выделения клиновидной области из плоскости с квадратным отверстием, оговоренную выше.

Таким образом, предложен метод решения систем интегральных уравнений, позволяющий получить непрерывные и ограниченные всюду значения напряжений, переводя проблему угловых точек в разряд корректных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боджи Д.Б. Действие поверхностных нагрузок на систему из двух соединенных вдоль одной из граней упругих клиньев, изготовленных из различных материалов и имеющих произвольные углы раствора // Прикладная механика. Американское общество инженеров механиков. – 1971. – Серия Е. – т.38. – № 2. – С. 87-96.

2. Баренблатт Г.И., Христианович С.А. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР, ОТН. – 1955. - № 11. – С. 73-86.

3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.

© В. Е. Миренков, В. А. Шутов, 2017

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ С УГЛОВЫМИ ТОЧКАМИ

Валерий Егорович Миренков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 187, e-mail: mirenikov@misd.nsc.ru

Валерий Алексеевич Шутов

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусства, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, доктор технических наук, профессор, тел. (913)896-74-66, e-mail:va_shutov@mail.ru

Проанализирован характер деформирования в окрестности угловых точек. Предложен метод численной реализации полученных интегральных уравнений. Рассмотрен пример.

Ключевые слова: решение, граничные условия, угловые точки, бесконечность, напряжения, смещения.

NUMERICAL REALIZATION OF DEFORMATION OF AREAS CONTAINING ANGULAR POINTS

Valery E. Mirenikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Professor, Principal Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 187, e-mail: mirenikov@misd.nsc.ru

Valery A. Shutov

Novosibirsk State University of Architecture, Design, and Arts, 630091, Russia, Novosibirsk, 38 Krasny prospect, D. Sc., Professor, tel. (913)896-74-66, e-mail:va_shutov@mail.ru

The character of deformation in periphery of angular points is analyzed. Method for numerical realization of derived integral equations is proposed. The case study is discussed.

Key words: solution, boundary conditions, angular points, infinity, stresses, shear, displacement.

Метод решения задачи теории упругости для клиновидных областей как и другие классические методы позволяет получать сингулярное решение, однако, в отличие от всех прочих, он допускает возможность реализации корректной постановки. Действительно, при реальном деформировании в местах области проникновения материала в материал должна образоваться некоторая зона (в которой имеет место некий аналог контактной задачи Герца), подлежащая определению в процессе решения.

Таким образом, сказанное позволяет получить ответ о характере деформирования клиновидных областей. В частности, бесконечность напряжений, с определяемой особенностью, является следствием фактически существующего, жесткого кинематического ограничения, которое классические постановки задач о клине замалчивают [1]. Аналогичная ситуация наблюдается и в решениях для трещин [2], т. е. они соот-

ветствуют «жесткому» закреплению ее вершины и, конечно же, не адекватны существу проблемы.

По-видимому, следствием отмеченного факта является (если отнести нормальные граничные условия к деформируемому контуру, например, нижней грани отверстия) появление значительной по величине горизонтальной составляющей внешних усилий, никак не оговариваемой в исходных данных. Некорректность классической формулировки задачи легко, в частности, увидеть и при рассмотрении следующего к ней подхода. В силу симметрии деформирования области, представленной на рис. 1, на продолжении диагоналей отверстия отсутствуют касательные напряжения и нормальные перемещения, что позволяет представить исходную пластину состоящей из четырех отдельных частей, приведенных в соприкосновение без трения, или же, что проще, рассматривать втягивание без трения одной из этих четвертей в абсолютно жесткую матрицу (рис. 2)..

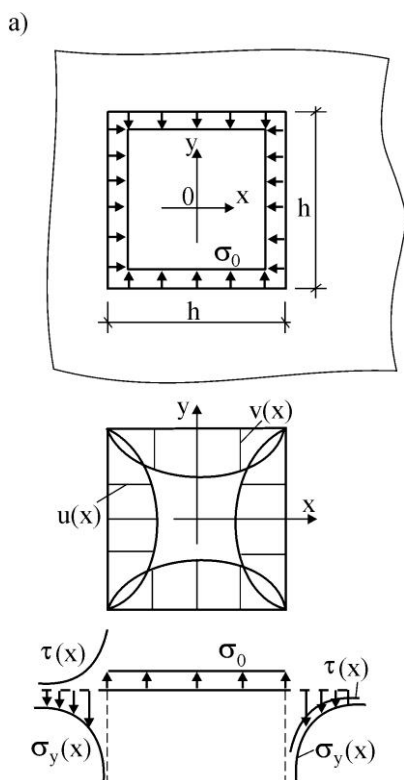


Рис. 1. Качественный характер деформирования полости с квадратным отверстием

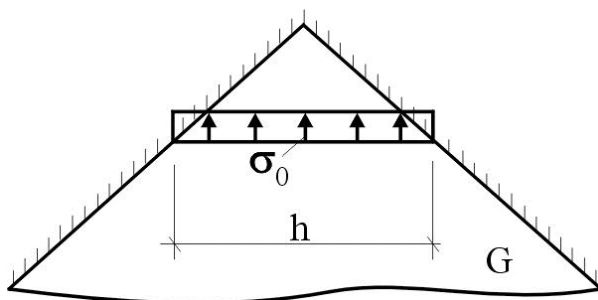


Рис. 2. Схема деформирования четверти с квадратным отверстием

Таким образом, представленные на рис. 1, а и рис. 2 схемы постановок, фактически одной задачи, существенно различны, при этом последняя, как представляется, ближе к правильному отражению исходной ситуации. И лишь теперь можно переходить к численному моделированию вне зависимости от вероятной сложности его реализации.

В результате деформирования угловая точка квадратного отверстия сместится, оставаясь угловой точкой контура. Для несжимаемого материала нетрудно получить верхнюю оценку величины этого смещения, которое оказывается много больше упругих смещений в рамках малых деформаций. Эти перемещения представляют собой, в известном смысле, одну из искоемых величин некоего аналога задачи Герца, а поэтому и определять их следует в процессе решения.

Не уменьшая общности, остановимся для конкретизации на случае описываемом системой (13). Расчетная схема имеет в этом случае вид, представленный на рис. 3.

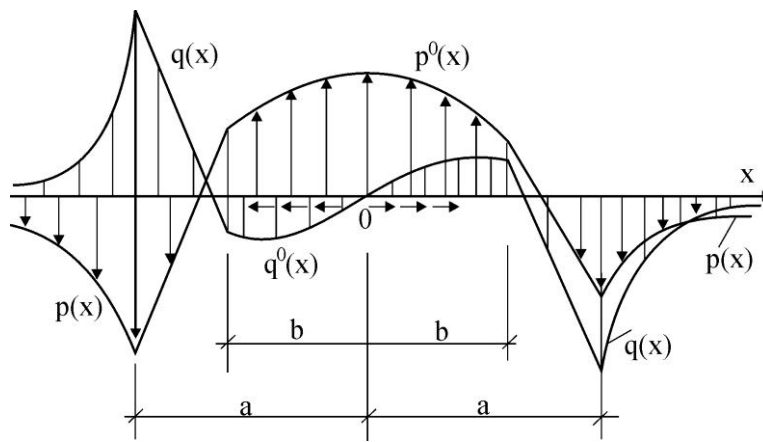


Рис. 3. Расчетная схема

С целью соблюдения условий теории упругости при формулировке граничных условий необходимо учесть непрерывность напряжений. В связи с малостью области $a-b$, обусловленной соответствующей гипотезой теории, искомые компоненты σ_y, τ_{xy} будем аппроксимировать линейными функциями

$$\sigma_y = \begin{cases} \alpha \cdot x + \beta, & b \leq x \leq a, \\ -\alpha \cdot x + \beta, & -a \leq x \leq -b, \end{cases}$$

$$\tau_{xy} = \begin{cases} m \cdot x + n, & b \leq x \leq a, \\ m \cdot x - n, & -a \leq x \leq -b, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{p(a) - \sigma_0}{a - b}, \quad \beta = \frac{a \cdot \sigma_0 - b \cdot p(a)}{a - b},$$

$$m = \frac{q(a)}{a - b}, \quad n = -\frac{b \cdot q(a)}{a - b},$$

$p(a), q(a)$ – значения искоемых напряжений в точке $x=a$.

С учетом (1) система из [1] примет вид

$$\begin{aligned}
 & p(x) - \frac{2(x-a)}{\pi} \cdot \int_a^\infty K_1(t, x) p(t) dt - \frac{2}{\pi} \int_a^\infty K_2(t, x) \cdot q(t) dt = \\
 & = \frac{2}{\pi} \cdot (x-a) \cdot \left\{ \int_b^a (\alpha t + \beta) \cdot K_1(t, x) dt + \int_{-b}^b \frac{(t-a)^2 \cdot p^0(t)}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2} dt \right\} + \\
 & + \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \int_b^a (mt + n) \cdot K_2(t, x) dt + \int_{-b}^b \frac{(t-a)^3 \cdot q^0(t)}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2} dt \right\}, \quad (2) \\
 & q(x) - \frac{2(x-a)^2}{\pi} \cdot \int_a^\infty K_3(t, x) p(t) dt - \frac{2}{\pi} (x-a) \int_a^\infty K_4(t, x) \cdot q(t) dt = \\
 & = \frac{2}{\pi} \cdot (x-a)^2 \cdot \left\{ \int_b^a (\alpha t + \beta) \cdot K_3(t, x) dt + \int_{-b}^b \frac{(t-a) \cdot p^0(t)}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2} dt \right\} + \\
 & + \frac{2}{\pi} (x-a) \cdot \left\{ \int_b^a (mt + n) \cdot K_2(t, x) dt + \int_{-b}^b \frac{(t-a)^2 \cdot q^0(t)}{[(t-a)^2 + (x-a)^2]^2} dt \right\}.
 \end{aligned}$$

В качестве примера рассмотрим задачу со следующими исходными данными:

$$p^0(t) = \sigma_0 = \text{const}, \quad q(t) = 0, \quad \text{для } |t| \geq b. \quad (3)$$

Систему уравнений (2) запишем для этого случая так:

$$\begin{aligned}
 & p(x) + \int_a^\infty D_1(t, x) p(t) dt + \int_a^\infty D_2(t, x) \cdot q(t) dt = F_1(x), \\
 & q(x) + \int_a^\infty D_3(t, x) p(t) dt + \int_a^\infty D_4(t, x) \cdot q(t) dt = F_2(x), \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $F_1(x), F_2(x)$ – соответствующие правые части уравнений (2) при выполнении (3):

$$\begin{aligned}
 & D_1(t, x) = -\frac{2}{\pi} (x-a) K_1(t, x), \quad D_2(t, x) = -\frac{2}{\pi} K_2(t, x), \\
 & D_3(t, x) = -\frac{2}{\pi} (x-a)^2 K_3(t, x), \quad D_4(t, x) = -\frac{2}{\pi} (x-a) K_4(t, x).
 \end{aligned}$$

Решение системы уравнений (3) было проведено методом конечных сумм, т.е. задача сведена к решению системы $2N$ линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned}
 & P_i + \sum_{j=1}^N (D_{1,ij} \cdot P_j + D_{2,ij} \cdot Q_j) = F_{1,i}, \quad i=1, \dots, N, \\
 & Q_n + \sum_{m=1}^N (D_{3,nm} \cdot P_m + D_{4,nm} \cdot Q_m) = F_{2,n}, \quad n=1, \dots, N, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $P_k = p(x_k)$, $Q_k = q(x_k)$, $F_{1k} = F_1(x_k)$, $F_{2k} = F_2(x_k)$; x_k – значения x в центрах интервалов разбиения (длины $2 \cdot \Delta_k$) отрезка оси интегрирования;

$$D_{k,ij} = \int_{x_j - \Delta_j}^{x_j + \Delta_j} D_k(x, \xi) d\xi.$$

Исходная система интегральных уравнений (13) позволяет получить, вообще говоря, сингулярное решение и только в случае, когда значения $(a-b)$, $p(a)$, $q(a)$ заданы точно, – решение всюду ограниченное. Это положение существенно при численной реализации (4). Фиксируя, например, величину $a-b$, перебираем ряд значений $p(a)$ и $q(a)$. Если $a-b$ указано точно, то $p(a)$, $q(a)$ должны удовлетворять исходной системе уравнений. В случае же, когда выбранное значение $a-b$ отличается от неизвестного точного, то существует и $p(a)$, $q(a)$, определяемых перебором и удовлетворяющих системе уравнений. Поэтому задается новое значение $a-b$ и осуществляется новая попытка подбора $p(a)$, $q(a)$. Такая последовательность действий продолжается до тех пор, пока не будет получено единственное и всюду ограниченное решение. Указанная процедура поиска решения представляется лишь на первый взгляд достаточно утомительной, однако с приобретением некоторого навыка приводит относительно быстро к искомому результату. При этом, как показывает опыт, важное значение имеет знание характера поведения решения для случая $a=b$ на достаточном удалении от точки $x=a$. Но даже эти нестрогие вехи пути получения точного (в «машинном» приближении) решения оправдываются относительно быстрым нахождением единственного ограниченного решения.

На рис. 4 приведены результаты расчета $(a-b)$, $p(x)$, $q(x)$ для случая граничных условий, сформулированных в виде (3). Число N в (5) было принято равным ста, шаг разбиений $2 \cdot \Delta_k$ переменный (увеличивающийся) с удалением от $x=a$, отрезок интегрирования при $a=1$ больше 100.

На рис. 5 аналогичные результаты представлены для случая граничных условий: $q^0(x) = 0$, а $p^0(x)$ – равнобедренный треугольник с высотой равной единице при $x=0$.

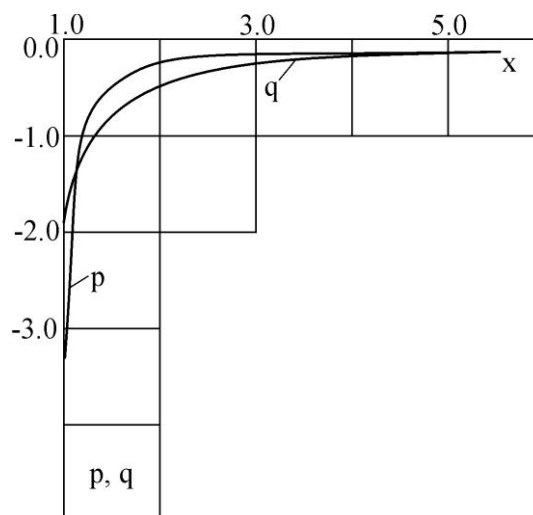


Рис. 4. Распределение $p(x)$, $q(x)$ на $x > a$

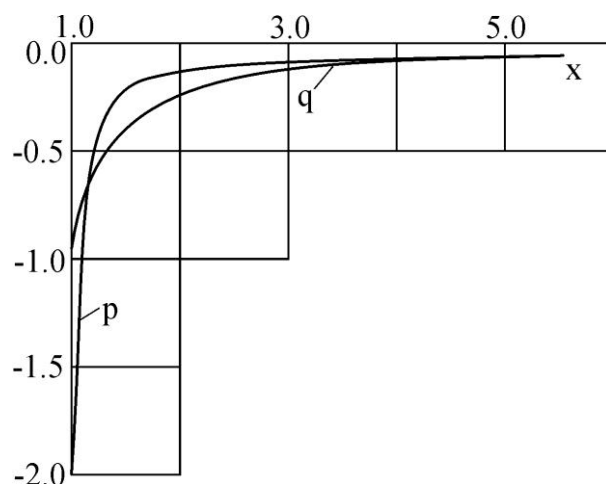


Рис. 5. Распределение $p(x)$, $q(x)$ на $x > a$

Сравнение результатов расчетов показывает, что как область a - b , так и значения $p(a)$, $q(a)$ во втором примере меньше соответствующих им в первом. Из сравнения рис. 4 и рис. 5 видно, что хотя равнодействующие $p^0(x)$ в этих примерах различаются в два раза, результат зависит от характера распределения $p^0(x)$.

Таким образом, предложен метод решения системы интегральных уравнений, позволяющий реализовать непрерывные и ограниченные всюду значения напряжений, и, тем самым, свести проблему угловых точек в разряд корректных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боджи Д.Б. Действие поверхностных нагрузок на систему из двух соединенных вдоль одной из граней упругих клиньев, изготовленных из различных материалов и имеющих произвольные углы раствора // Прикладная механика. Американское общество инженеров механиков. – 1971. – Серия Е. – т.38. – № 2. – С. 87-96.
2. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.

© В. Е. Миренков, В. А. Шутов, 2017

ОБЪЕМНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШАХТЫ ВОРКУТИНСКАЯ-ЗАПОЛЯРНАЯ ПО ДАННЫМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Антон Владимирович Панов

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, младший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 337, e-mail: naz@misd.ru

Андрей Петрович Аверин

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (495)360-07-35, e-mail: averin.andrey@gmail.com

Петр Владимирович Николенко

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (495)360-07-35, e-mail: petrov-87@mail.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (383)205-30-30, доп. 335, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Разработана трехмерная модель геомеханического пространства шахты Воркутинская-Заполярная, учитывающая деформационно-прочностные свойства пород и изменение конфигурации выработанного пространства при панельной отработке угольного пласта. Модель реализована методом конечных элементов с использованием оригинального кода, адаптированного для многопроцессорных кластеров. Выполнен мультипараметрический анализ напряженно-деформированного состояния углепородного массива и, с использованием лабораторных данных о зависимости скоростей V_p и V_s упругих волн от напряжений, построены необходимые для томографии карты пространственного распределения V_p в угольном пласте на различных стадиях отработки.

Ключевые слова: углепородный массив, объемная геомеханическая модель, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, скорость упругих волн.

VOLUMETRIC STRESS-STRAIN STATE OF VORKUTINSKAYA-ZAPOLYARNAYA MINE FIELD ACCORDING TO GEOMECHANICAL MODELING DATA

Anton V. Panov

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Junior Researcher, Geotechnology Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Leonid A. Nazarov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 337, e-mail: naz@misd.ru

Andrey P. Averin

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Ph. D., Senior Researcher, Geotechnology Laboratory, tel. (495)360-07-35, e-mail: averin.andrey@gmail.com

Peter V. Nikolenko

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Ph. D., Researcher, Geotechnology Laboratory, tel. (495)360-07-35, e-mail: petrov-87@mail.ru

Larisa A. Nazarova

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, D. Sc., Leading Researcher, Geotechnical Processes Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 335, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

3D model of the geomechanical space of Vorkutinskaya-Zapolyarnaya Mine is constructed with consideration for strain-strength rock properties and variations in worked out space shape under panel coal mining. The model is realized by the finite element method with the use of the original code adapted for multi-processor clusters. Multiparameter analysis of the stress-strain state of the coal-rock mass is performed based on laboratory data on relationship of elastic wave velocities V_p and V_s vs. stresses. The necessary-for-tomography maps of spatial V_p distribution in a coal seam at different mining stages are made.

Key words: coal-rock mass, 3D geomechanical model, stress-strain state, finite element method, elastic wave velocity.

Введение. В России подземным способом добывается около трети всего объема извлекаемого угля. В современных геотехнологиях применяются высокопроизводительные проходческие и очистные комплексы, способные обеспечить скорость продвижения лавы до 15 м/с при протяженности последней 200-300 м [1]. При таких темпах горных работ происходит достаточно быстрое изменение геомеханических полей не только в окрестности забоя, но и в шахте в целом, что может стать причиной формирования и реализации нежелательных геодинамических явлений. Для их прогноза используются системы мониторинга [2,3], которые регистрируют, обрабатывают и интерпретируют микросейсмическую информацию, обычно применяя методы “большой сейсмологии”. При этом напряженно-деформированное состояние, как правило, не учитывается, хотя является основным элементом любого критерия прочности материалов и устойчивости массива горных пород. Как показано в [4], совместный анализ полей напряжений и данных томографии может существенно расширить возможности систем мониторинга, в частности, привлекая данные лабораторных экспериментов, восстановить текущее распределение некоторых параметров напряженного состояния, а также, посредством решения граничной обратной задачи – оценить горизонтальные компоненты внешнего поля напряжений.

К настоящему времени на объектах ОАО “Воркутауголь” разворачивается система шахтного мониторинга. Настоящая работа, в которой построена объемная геомеханическая модель шахты “Воркутинская-Заполярная”, является первым этапом создания методической основы для интерпретации микросейсмической информации.

Геомеханическая модель: структура объекта и физические свойства пород.

Размеры расчетной области D ($3.7 \times 1.9 \times 0.5$ км) выбраны таким образом, чтобы подготавливаемый выемочный участок оказался в центре (рис. 1). Отрабатываемый пласт (мощность 3 м) в пределах D расположен на глубинах от 650 до 840 м. Информация о величине региональных горизонтальных напряжений для Печорского угольного бассейна практически отсутствует, поэтому, экстраполируя данные [5], примем, что в окрестности исследуемого объекта имеет место сбросовый геодинамический режим, характеризуемый коэффициентами бокового отпора $q_x \leq q_y < 1$ [6].

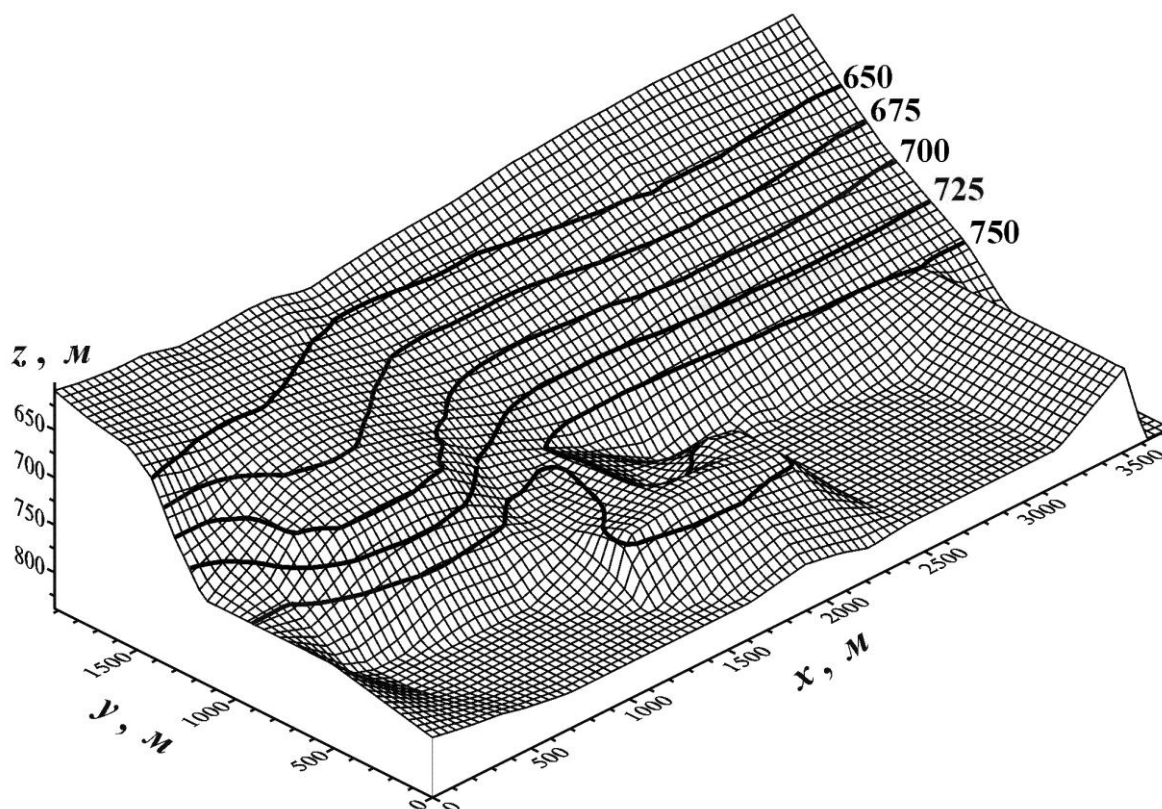


Рис. 1. Фрагмент дискретизации области D на конечные элементы, (x, y, z) – декартовы координаты

Свойства горных пород (E -модуль Юнга, ν -коэффициент Пуассона, ρ -плотность), слагающих массив приведены в таблице. Расчеты велись методом конечных элементов с использованием оригинального кода [7,8], область D содержала $371 \times 193 \times 85$ узлов по соответствующим осям координат, верхняя горизонтальная граница D расположена на расстоянии 550 м от дневной поверхности.

Физические свойства пород

Порода	ρ , кг/м ³	E , ГПа	ν	A , м/с	B , м/с	α , МПа ⁻¹
Вмещающие породы	2200	40	0.25	2900	1000	0.058
Уголь	1500	10	0.27	2698	484	0.078

Результаты расчетов. В качестве примера на рис. 2 показано распределение напряжения σ_{xx} в среднем сечении угольного пласта. Следует отметить, что вследствие перепада глубин залегания последнего, в западной части пласта напряжения существенно выше. Это необходимо учитывать при выборе направления отработки.

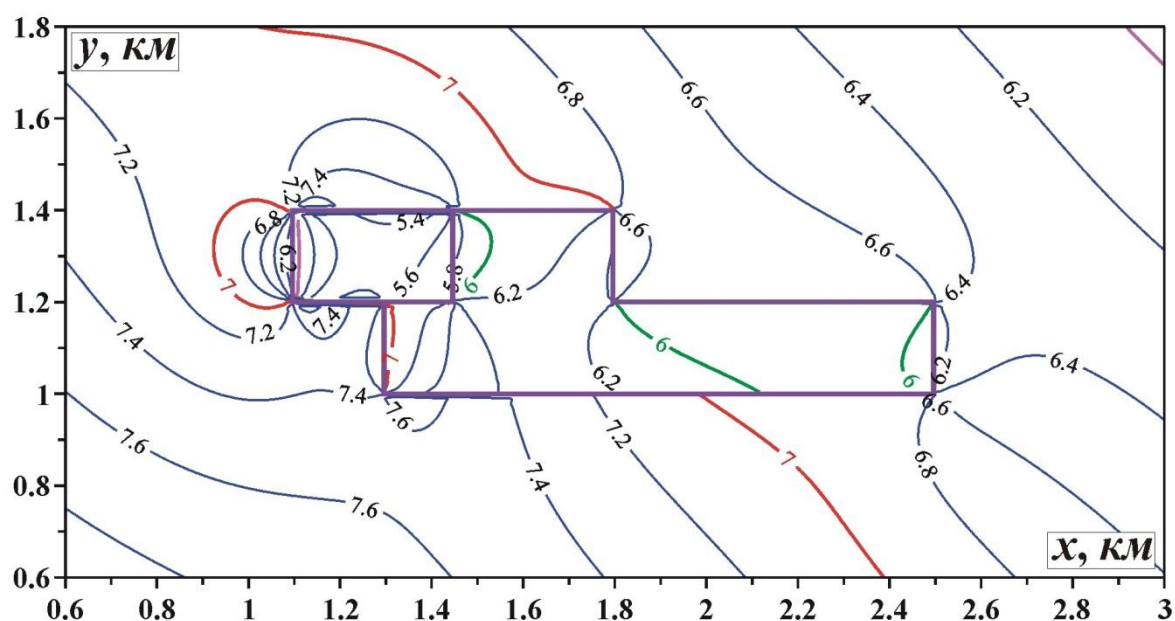


Рис. 2. Изолинии горизонтальной компоненты тензора напряжений σ_{xx} (МПа) в среднем сечении пласта для $q_x=q_y=0.5$

Данные системы мониторинга состояния породного массива часто используются для томографии [9]. Ее точность во многом зависит от качества выбора референтной модели. При задании начального распределения скоростей распространения продольных волн V_p в среде необходимо учитывать зависимость V_p от напряжений. Аппроксимация данных лабораторных экспериментов на углях [10] и песчаниках [11] позволила построить эмпирическую зависимость

$$V_p(\sigma) = A - B \exp(-\alpha \sigma) \quad (1)$$

(σ – среднее напряжение), константы A , B и α приведены в таблице.

Рис. 3 демонстрирует распределение V_p в среднем сечении пласта, построенное по рассчитанному полю напряжений $\sigma_{ij}(x,y,z)$ и (1), где $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$. Следует отметить, что:

♦ как и следовало ожидать, наибольшие изменения V_p претерпевает в окрестности выработанного пространства;

♦ с увеличением глубины пространственный градиент V_p падает вследствие выполаживания зависимости $V_p(\sigma)$ с ростом среднего напряжения.

Построенная геомеханическая модель объекта предназначена для оперативного выбора референтного распределения скорости продольных волн и будет положена в основу разрабатываемого томографического модуля системы мониторинга шахты “Воркутинская-Заполярная”.

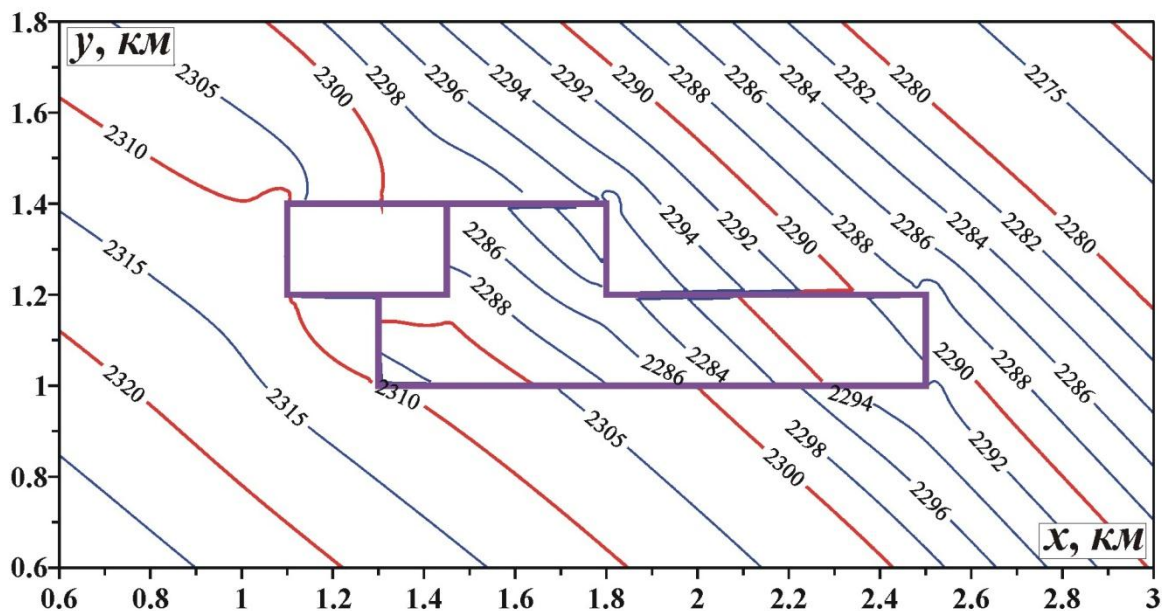


Рис. 3. Изолинии V_p (км/с) в среднем сечении пласта при $q_x=q_y=0.5$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00029).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. Н. Захаров, О. Н. Малинникова, А. П. Аверин. Моделирование вибрационно-колебательных процессов горных пород в призабойной зоне углепородного массива при техногенном воздействии // Горный журнал. 2016 № 12. С. 28-32.
2. В. Н. Захаров Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 2002, 172 с.
3. Zhenbi, L., Baiting, Zh. Microseism Monitoring System for Coal and Gas Outburst // International Journal of Computer Science Issues. 2012. V. 9. Issue 5. N 1. P. 24-28.
4. Л. А. Назарова, Л. А. Назаров, М. И. Протасов. Реконструкция объемных полей напряжений в углепородном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. 2016. № 4. С. 12 – 21.
5. www.dc-app3-14.gfz-potsdam.de
6. Л. А. Назарова. Использование сейсмотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // ФТПРПИ. 1999. № 1. С. 28-36.

7. П. Г. Дядьков, Л.А. Назаров, Л.А. Назарова. Численное моделирование напряженного состояния земной коры и условий возникновения динамической неустойчивости сейсмоактивных разломов при рифтогенезе // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 12. С. 2001-2010.
8. П. Г. Дядьков, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова. Трехмерная вязкоупругая модель литосферы Центральной Азии: методология построения и численный эксперимент// Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 91-101.
9. Luxbacher, K.D., Westman, E.C., Swanson, P.L. Karafakis, M. Three-Dimensional Time-Lapse Velocity Tomography of an Underground Longwall Panel // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2008. V. 45(4). P. 478-485.
10. В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко, А. Е. Кошелев. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. 2016. № 5. С. 48-53.
12. Pervukhina, M., Gurevich, B., Dewhurst, D.N., Siggins, A.F. Applicability of velocity–stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks // Geophysical Journal International. 2010. V. 181. N 3. P. 1473–1479.

© А. В. Панов, Л. А. Назаров, А. П. Аверин, П. В. Николенко, Л. А. Назарова, 2017

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Андрей Владимирович Патутин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

В работе рассмотрены вопросы интерпретации экспериментальных данных измерительного гидроразрыва. Показано, что в случае использования локального разрыва с радиусом трещины 1–2 метра применение классического подхода к оценке минимального действующего напряжения даёт завышенные результаты.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, напряженное состояние, минимальное напряжение, скважинные исследования.

PECULIARITIES IN MINIMUM STRESS ESTIMATION BY MEASUREMENT HYDRO-FRACTURING METHOD

Andrey V. Patutin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Leonid A. Rybalkin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Research Student, Junior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Interpretation of experimental measurement hydrofracturing data is considered. It is justified that the classical approach to evaluation of the minimum effective stress gives overestimated results provided that the local fracturing with 1–2 m fracture radius is applied.

Key words: measurement hydrofracturing, stress state, minimum stress, borehole measurements.

Измерение действующих в горном массиве напряжений является одной из основных задач геомеханики. Получение достоверных данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) позволяет успешно решать вопросы эффективной разработки месторождений полезных ископаемых, строительства и эксплуатации подземных объектов. К наиболее распространённым методам оценки напряжений относится гидравлический разрыв пласта (ГРП), при этом используются данные измерений давлений раскрытия и закрытия единичной трещины [1].

Особенностью используемого в горном деле и подземном строительстве метода является масштаб формируемых трещин. В этом случае ГРП проводят малогабарит-

ными устройствами с созданием трещин радиусом 1–2 метра. Развитие теории гидроразрыва на начальном этапе происходило в связи с оптимизацией разработки нефтегазовых месторождений, при этом размеры создаваемых трещин достигали десятки и сотни метров. Несмотря на это, для обработки и тех, и других данных используются одинаковые подходы и методики определения минимального сжимающего напряжения $\sigma_{\min}$. Параметры трещины и устройства разрыва в расчетные формулы не входят, соответственно не оценивается их влияние на точность определения напряжений методом гидроразрыва [2].

Интерпретация получаемых данных основана на предположениях, что разрыв образуется вдоль скважины в направлении максимального сжимающего напряжения $\sigma_{\max}$, действующего по нормали к ее оси, не выходит в скважину вне интервала герметизации, и оба крыла трещины симметричные и плоские. На графике $P(t)$ выделяют характерные точки, называемые давлениями раскрытия P_r и запираания P_s , регистрируемые соответственно при повторной подаче и остановке закачки рабочей жидкости в созданную трещину. При этом предполагается, что давление P_s “достаточно длинной” трещины равно её эффективному сжатию вмещающими горными породами $\sigma_{\min}$. Широкое распространение получила следующая схема интерпретации регистрируемых данных [3]:

$$P_s = \sigma_{\min} \quad (1)$$

$$P_r = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} \quad (2)$$

При использовании уравнения (1) возникают следующие вопросы. Первый из них связан с определением точки P_s на графике $P(t)$, второй – в ее интерпретации.

Для определения положения этой точки на графике $P(t)$ предложены несколько методик; разброс оценок P_s , получаемых разными подходами, может достигать 14–42 % [4]. К этому следует добавить субъективность выбора интервалов времени для построения касательных линий к графику $P(t)$, а также ошибки измерения P и t . Неоднозначность выделения P_s связана также с непостоянством dP/dt в обеих указанных областях кривой падения давления.

Другим вопросом является интерпретация P_s . Одни исследователи считают, что P_s соответствует остановке роста трещины в условиях равномерного давления жидкости на ее берега, другие полагают, что значение P_s связано с моментом смыкания берегов трещины гидроразрыва при $P(t) = \sigma_{\min}$. Для разрывов большого размера эти давления практически совпадают, и вопрос интерпретации P_s не возникает. При локальных разрывах это не так, и размер трещины, а значит, и геометрические параметры скважинного устройства могут иметь значение [5]. Влияние этих параметров на точность определения напряжений в породном массиве исследовалось в ходе проведения лабораторных экспериментов.

Схема лабораторной установки включала устройство гидроразрыва, насос с баком и обратным клапаном на выходе, пресс, дроссель и соединительные рукава высокого давления. Измерительная система содержала датчик давления ЛХ-412/400, электронное согласующее устройство для преобразования выходного сигнала тензометрического датчика, АЦП и компьютер для регистрации и обработки данных.

В ходе экспериментов устройство гидроразрыва вставляли в скважину диаметром 16 мм, пробуренную в блоке оргстекла. Рабочую жидкость подавали в интервал разрыва. Внешнее нагружение модели не применяли. Утечки рабочей жидкости в породе моделировали с помощью регулируемого дросселя. Замеры давления выполняли дискретно по времени $P(t_i)$ с шагом $\Delta t = 1$ мс.

На рисунке приведены графики давления $P(t)$ двух разрывов, один из которых достиг в своем развитии поверхности оргстекла (а), а другой – нет (б). В первом случае давление быстро стремится к нулевому значению, во втором – лежит существенно выше.

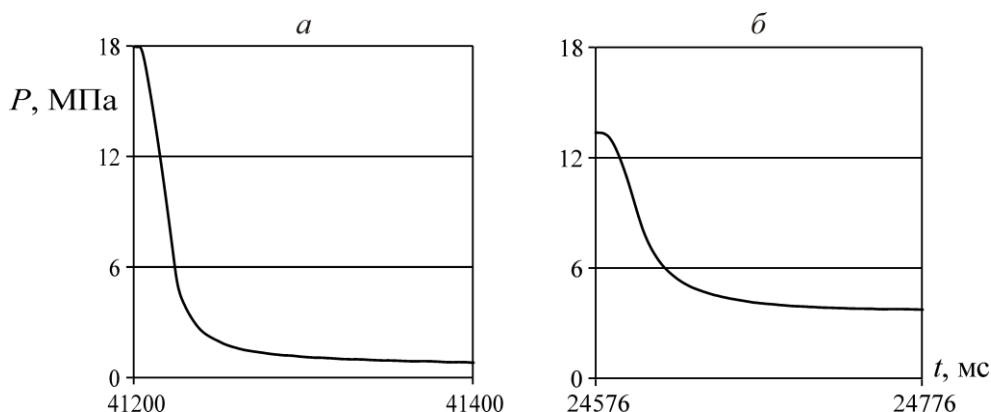


Рис. Кривые падения давления рабочей жидкости в интервале гидроразрыва:

а, б – для трещин радиусом 94 и 86 мм соответственно с выходом и без выхода в борт модели

Обработка кривых падения давления выполнена в координатах $\frac{P(t_i) - P(t_{i+1})}{\Delta t} = -\frac{dP}{dt}$ и минус P (обратная шкала). Аппроксимация полученных нисходящих ветвей кусочно-линейной функцией дает точки излома, из которых практический интерес представляет точка с наибольшим значением давления. Полученные результаты вместе с радиусом трещин, близких по форме к диску, и давлением разрыва материала P_F , приведены в таблице.

Таблица

Замеры и расчеты давлений запираания и распространения трещин

Средний радиус трещины, см	Характеристика трещины	P_S (замеры)	P_F (расчет при $K_{IC} = 1.20$ МПа·м ^{1/2})	P_F (расчет при $K_{IC} = 1.47$ МПа·м ^{1/2})
8.6	Продольная без выхода в борт модели	4.84	3.63	4.44
8.8	Продольная без выхода в борт модели	4.82	3.58	4.39
9.4–12.1	Под углом 10–15° к оси скважины, вышла в борт модели	3.93–4.13	3.06–3.47	3.75–4.25
12.5	Продольная с выходом в борт модели	3.39	3.01	3.68

Приведенные в таблице данные показывают, что для определения минимального напряжения методом гидроразрыва не обязательно, чтобы трещина формировалась строго вдоль скважины. Выход разрыва на свободную поверхность, в том числе в скважину, и вызванная этим разгерметизация трещины также не критичны для измерений. Основной вывод из полученных результатов состоит в том, что применение формулы $P_s = \sigma_{\min}$ для обработки данных локальных гидроразрывов ведет к завышенным оценкам минимального напряжения, действующего в породном массиве.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 16-35-00161 мол_а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hubbert M.K., Willis D.G. Mechanism of hydraulic fracturing // Trans. AIME. – 1957. – Vol. 210. – P. 153–168.
2. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 6–14.
3. Bredehoeft J.D., Wolf R.G., Keys W.S. and Shutter E. Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field in the Piceance Basin, Colorado // Geological Society of American Bulletin. – 1976. – Vol. 87. – No. 2. – P. 250–258.
4. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О методах косвенного определения величины давления запаривания трещины при измерительном гидроразрыве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 265–269.
5. Choi S.O. Interpretation of shut-in pressure in hydrofracturing pressure-time records using numerical modeling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2012. – Vol. 50. – P. 29–37.

© А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин, 2017

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОСОРТНЫХ МАРГАНЦЕВЫХ РУД СИБИРИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Галина Ивановна Пушкарёва

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доп. 163, e-mail: galinapush@mail.ru

Представлены результаты исследований окислительных и сорбционных свойств низкосортных марганцевых руд четырех месторождений Сибири с целью оценки возможности использования их для очистки природных и техногенных вод от загрязняющих примесей органической и неорганической природы.

Ключевые слова: марганцевые руды, окисление, сорбция, очистка.

UTILIZATION OF SIBERIAN POOR MANGANESE ORES TO SETTLE ECOLOGICAL PROBLEMS

Galina I. Pushkareva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Researcher, Laboratory for Mineral Processing and Technological Ecology, tel. (383)205-30-30, extension 163, e-mail: galinapush@mail.ru

Experimental data on oxidizing and adsorption properties of low-grade manganese ores originated from four Siberian deposits are reported with the purpose to assess feasibility to utilize the study ores to process natural and industrial waters with removal of organic and inorganic impurities.

Key words: manganese ores, oxidation, adsorption, purification.

Марганцевые руды Сибири представлены в основном бедными, труднообогатимыми рудами сложного состава, использование которых в металлургии связано с большими проблемами. Возникает необходимость вовлечения таких руд в другие отрасли промышленности: химическую, электротехническую, лакокрасочную, производство стекла, керамики, антикоррозионных покрытий, сельское хозяйство. Одним из перспективных направлений использования низкосортных марганцевых руд является очистка природных и техногенных водных сред от токсичных загрязнителей органической и неорганической природы.

Цель данной статьи – обобщить результаты исследований возможности использования марганцевых руд Сибири в процессах водоочистки природных и техногенных вод, в том числе в местах добычи и переработки полезных ископаемых.

Были исследованы образцы марганцевых руд четырех месторождений: Дурновского, Порожинского, Усинского и Селезеньского. Главным рудным минералом Дурновского и Селезеньского месторождений является псиломелан, присутствуют: пиролюзит, манганит, криптомелан и др. Порожинское месторождение характеризуется наличием оксидных и карбонатных руд. Основные оксидные рудные минералы – пиролюзит, манганит, псиломелан; карбонатные – родохрозит. Карбонатные руды Усинского месторождения представлены несколькими разновидностями, различаю-

щимися минеральным составом и содержанием марганца: родохрозитовые, мангано-кальцитовые, кремнисто-карбонатные и карбонатно-силикатные. Окисленные руды представлены псиломелановыми, вернадитовыми и пиролюзитовыми минеральными разновидностями.[1]

Образцы рудных материалов были отмыты водой от песчано-глинистой составляющей, высушены, измельчены до размера частиц 0.5-3.0 мм и 10-100мкм. Подготовленные таким образом пробы рассматривались как исходные. Руды Усинского и Порожинского месторождений были термически обработаны при температуре 600°C в течение одного часа с целью разложения карбонатов. После такой обработки структура минералов плохо окристаллизована, несовершенна, характеризуется высоким содержанием активных центров и, следовательно, высокой сорбционной и окислительной способностью. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что происходит практически полное разрушению структуры минералов и образованию окислов Mn: гаусманит (Mn_3O_4), биксбеит ($b-Mn_2O_3$), а также обнаруживаются следы хлорита железа и якобсита ($MnFe_2O_4$). Руды Дурновского и Селезеньского месторождения обогащали методом магнитной сепарации в магнитном поле напряженность 955000А/м. В руде Дурновского месторождения концентрацию марганца повысили с 16.36 до 36.53%, в руде Селезеньского – с 21,25 до 26,71%. В результате исследований установлено, что исходные и обогащенные руды проявляют окислительные и сорбционные свойства, но обогащенные – заметно активнее.

Наиболее важным свойством марганцевых руд является их окислительная способность. В работах [2,3] представлены результаты исследований возможности использования марганцевых руд для очистки подземных вод от двухвалентных ионов марганца и железа. На примере термически модифицированных родохрозитов Усинского месторождения и псиломелана Дурновского месторождения показано, что марганцевые руды обладают выраженными каталитическими свойствами реакции окисления ионов марганца двухвалентного до четырехвалентного и железа двухвалентного до трехвалентного, которые отделяются фильтрованием. Основным преимуществом использования марганцевых руд для очистки подземных вод по сравнению с искусственно полученными фильтрующими материалами является то, что не требуется химического возобновления поверхности в процессе эксплуатации, достаточно отмывки водой. Эффективность использования псиломелана для извлечения марганца и железа из подземной воды была апробирована на одной из станций обезжелезивания в г. Новосибирске. Остаточная концентрация марганца и железа не превышала 0.1мг/дм³(ПДК_{Mn}-0,1мг/дм³; ПДК_{Fe}- 0,3мг/дм³).

На предприятиях добычи и переработки тяжелых цветных металлов образуется большое количество сточных вод, содержащих ионы металлов, мышьяк, флоторегенты и другие загрязнения. Это создает сложную экологическую ситуацию в окружающей среде, поэтому проблемы качественной очистки стоков являются весьма актуальными.

Авторами [4,5] обнаружен эффект каталитического окисления арсенитов до арсенатов в водных растворах при контакте с поверхностью природного псиломелана или оксидных форм марганцевых руд других месторождений, что позволяет заметно улучшить степень очистки от мышьяка на марганцевых рудах и других сорбентах, например, на брусите т.к. сорбционная емкость по отношению к арсенатам значительно выше, чем к арсенитам. Необходимо отметить, что арсенаты магния и марганца относятся к классу труднорастворимых соединений и пригодны для захоронения.

В регионах с длительным периодом низких температур возникает необходимость очистки флотационных сточных вод от ксантогенатов, т.к. при повышенном содержании их ухудшаются органолептические свойства воды, что выражается в появлении неприятного запаха и вкуса. Установлены нормативы в воде водоемов: для этилксантогената калия ПДКв - $0,1 \text{ мг/дм}^3$, для изоамил- и изобутилксантогената калия $0,005 \text{ мг/дм}^3$. ПДК бутилксантогената в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет $0,001 \text{ мг/дм}^3$, в воде водных объектов рыбохозяйственного назначения - $0,03 \text{ мг/дм}^3$.

Исследования по очистке флотационных стоков от ксантогенатов с использованием марганцевых руд проводили на модельных растворах бутилового ксантогената калия и реальных стоках в статическом и динамическом режимах.

Полученные в результате исследований данные показывают, что низкосортные марганцевые руды после предварительной подготовки, проявляют окислительные свойства по отношению к ксантогенатам, которые зависят от концентрации марганца в руде и формы его соединений. Для практического применения рекомендуется использовать динамический режим обработки стоков на марганцевых рудах, т.к. в отличие от статического, при динамическом режиме обработки происходит наиболее полное разложение ксантогенатов.[6]

Если в сточной воде, содержащей ксантогенаты, присутствуют вещества, способные сорбироваться на поверхности руды, в том числе ионы тяжелых цветных металлов, то одновременно происходит сорбция металлов и окисление ксантогената. Поэтому необходимо периодически регенерировать поверхность марганцевой руды 2-3% раствором серной кислоты.

Установлено, что марганцевые руды проявляет сорбционную активность по отношению к цинку, никелю, меди, свинцу и другим тяжелым цветным металлам [5,7]. Изучены основные факторы (время контакта, pH водной среды, расход сорбента), влияющие на сорбционный процесс. Марганцевая руда карбонатного типа Усинского месторождения проявляет сорбционные свойства по отношению к ионам металлов в 2-3 раза выше, чем руды других месторождений за счет щелочных свойств, связанных с присутствием значительного количества оксида кальция. Щелочная среда создает условия для гидратации ионов металлов и образования комплексов, увеличивающих величину сорбции. Полученные в результате исследований данные свидетельствуют о принципиальной возможности использования марганцевых руд, как природного источника оксида марганца, в процессах сорбционной очистки водных сред от ионов тяжелых цветных металлов до санитарных норм.

Выводы

Низкосортные марганцевые руды Сибири могут быть эффективно использованы для решения целого ряда экологических проблем, потому что обладают высокими окислительными и сорбционными свойствами по отношению к загрязнителям водных сред органической и неорганической природы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нохрина О. И., Рожихина И. Д. Марганцевые руды России и возможные пути их применения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006.
2. Пушкарева Г. И., Скитер Н. А. Возможность использования марганцевых руд при водоподготовке // ФТПРПИ. – 2002. – № 6. – С. 103 – 107

3. Патент № 2226511 РФ. Способ очистки воды от марганца и железа/ Г.Р. Бочкарев, А. В. Белобородов, Г. И. Пушкарёва, Н. А. Скитер // Оpubл. в БИ. – 2004. – № 10.
4. Бочкарев Г.Р., Пушкарёва Г.И., Коваленко К.А. Извлечение мышьяка из природных вод и технологических растворов с использованием природного сорбента и катализатора // ФТПРПИ. – 2010. – № 2. – С. 102-108.
5. Бочкарев Г.Р., Пушкарёва Г.И. Коваленко К.А. О сорбционных свойствах марганцевых руд // ФТПРПИ. – 2011. – № 6 – С. 102–108.
6. Пушкарёва Г. И. Очистка сточных вод от ксантогенатов // Известия ВУЗов. Строительство.– 2016. – №12.
7. Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Бочкарев Г.Р., Пушкарёва Г.И., Коваленко К.А. Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ.–2014.– № 5.–С.187–205

© Г. И. Пушкарёва, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТОВОГО ПРОХОДЧИКА

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. лабораторией подземной строительной геотехники и геотехнологий, тел. (383)205-30-30, доп. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией механики взрыва и разрушения горных пород, тел. (383)205-30-30, доп. 107, e-mail: a.i.chanyshv@gmail.com

Дмитрий Олегович Чещин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории подземной строительной геотехники и геотехнологий, тел. (383)205-30-30, доп. 157, e-mail: dimixch@mail.ru

В работе предложена принципиальная конструктивная схема механизма изменения траектории движения пневмопробойника. Приведены результаты математического исследования взаимодействия наклонной площадки с грунтовым массивом.

Ключевые слова: скважина, пневмопробойник, скважины криволинейной траекторией, наклонная площадка, сдвиг грунта.

STUDY OF FACTORS AFFECTING ADJUSTMENT OF A PNEUMATIC-PUNCH PENETRATION PATH IN SOIL

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head, Underground Construction Equipment and Geotechnology Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Professor, Head, Explosion Mechanics and Rock Failure Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 107, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Dmitry O. Cheshchin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Underground Construction Equipment and Geotechnology Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 157, e-mail: dimixch@mail.ru

The authors propose the basic diagram of a device designed to adjust a penetration path of a pneumatic punch. The data on mathematical research of interaction of an inclined site with a soil mass are reported.

Key words: borehole, pneumatic punch, curved-path hole, inclined site, soil shear.

В настоящее время интенсивно развиваются технологии направленного бурения, в процессе которого осуществляется корректировка направления скважин. Это позволяет повысить точность траектории скважин и обеспечить их выход в заданную область подземного пространства.

В ИГД СО РАН разработан [1] и испытан управляемый грунтовый проходчик (пневмопробойник) выполненный по схеме изменения его внешней формы за счет отклонения задней части (рис. 1).

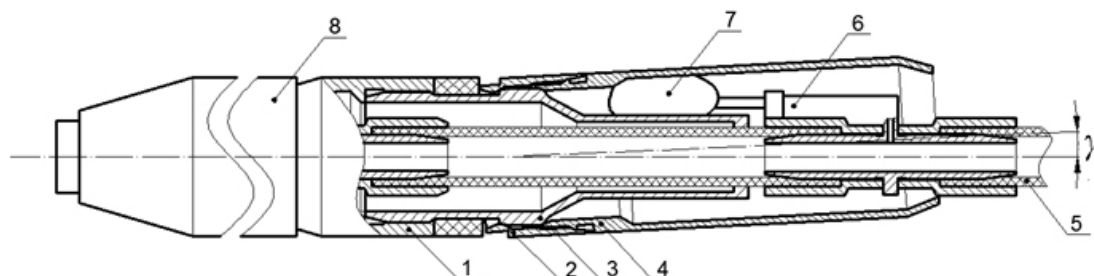


Рис. 1. Схема механизма управления траекторией грунтопроходчика (при отклоненной задней части)

Механизм (рис. 1) представляет собой отклоняющуюся заднюю часть 4, шарнирно соединенную с задней гайкой 1 пневмопробойника 8 посредством гайки 2 и втулки 3. Для создания отклоняющего усилия в устройство вмонтирована эластичная камера 7, управляемая с помощью клапанного механизма 6. Выбор направления отклонения пневмопробойника, осуществляется поворотом воздухоподводящего шланга (рукава) 5. Для отклонения корпуса пневмопробойника в эластичную камеру через клапанный механизм подается давление, создающее усилие для поворота его задней части относительно втулки 3 (и корпуса пневмопробойника 8 за счет их жесткой связи) на некоторый угол γ .

Для определения динамических параметров грунтопроходчика с механизмом управления траекторией, необходимо решить три задачи.

Первой задачей является определение усилия необходимого для внедрения отклоняемой задней части в стенку скважины.

Вторая задача – определение силы сопротивления грунта (породы), действующей на отклоненную заднюю часть при продольном движении машины. Эта сила создает момент, обеспечивающий разворот корпуса проходчика в заданном направлении. При этом величина ударного импульса должна быть достаточна для преодоления сил сопротивления, как на корпусе машины, так и на механизме управления траектории.

Третья задача, связана с определением угла поворота корпуса.

При моделировании процесса деформирования горной породы ее традиционно рассматривают как металл с двумя характеристиками – модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν . В реальном процессе деформирования горные породы обладают рядом отличительных черт. Прежде всего, они разносопротивляются при растяжении и сжатии. Объем горных пород увеличивается при сдвигах (эффект дилатансии), для грунтовой массы объем может как увеличиваться, так и уменьшаться, при возникновении стесненных условий.

Известны задачи, связанные с определением сил взаимодействия погружных машин с грунтом [2,3]. В данной работе решается задача определения нагрузки, необходимой для движения механизма управления траекторией в породе.

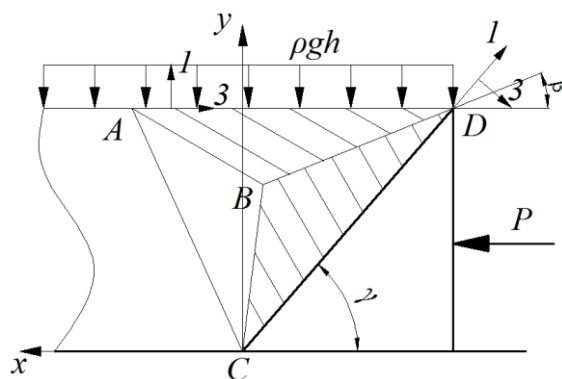


Рис. 2. Принципиальная схема движения отклоненной задней части машины

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_X}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_Y}{\partial y} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

и условие пластичности в виде:

где K – предел упругости материала, имеющий значение сцепления, ϕ^* - параметр среды, имеющий значение угла внутреннего трения. Характеристики статически определимой задачи (1), (2) равны [5,6]:

где $\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$, угол θ совпадает с углом между первым направлением для тензора напряжений и осью Ox .

Рассмотрим границу CD массива пород. По нормали $\bar{n}$, совпадающей с осью 3 (1-3 – главные оси тензора напряжений), возникает сжатие, создающее нагрузку меньшую, чем нагрузка по оси 1. Ось 1 на данной границе направлена по стороне CD . В этой задаче предполагается, что касательное напряжение $\tau_{nt}=0$, т.е. трением пренебрегается. В системе координат xOy вектор нормали $\bar{n} = (\sin \gamma, -\cos \gamma)$. Отсюда вектор напряжений $\bar{p}_n$ на этой площадке будет:

$$\bar{p}_n = (\sigma_x \cdot \sin 2\gamma - \tau_{xy} \cdot \cos 2\gamma)\bar{i} + (\tau_{xy} \cdot \sin 2\gamma - \sigma_y \cdot \cos 2\gamma)\bar{j}, \quad (4)$$

где $\bar{i}, \bar{j}$ – орты системы координат x, y . Если $\bar{t} = (\cos \gamma, \sin \gamma)$ – орт, направленный по оси 1 на стороне CD , то

$$\tau_{nt} = (\bar{p}_n \cdot \bar{t}) = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\gamma - \tau_{xy} \cdot \cos 2\gamma \quad (5)$$

Поскольку $\tau_{nt}=0$ на CD , то отсюда следует, что

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (6)$$

На CD напряжения можно определить как

$$\sigma_x = \sigma + T \cdot \cos 2\gamma, \quad \sigma_y = \sigma - T \cdot \cos 2\gamma, \quad \tau_{xy} = T \cdot \sin 2\gamma \quad (7)$$

Полагаем, что в каждой точке CD выполнено (2). Тогда $T = \frac{K}{\cos \varphi^*} - \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^*$ и вместо (7) получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{K \cdot \sin 2\gamma}{\cos \varphi^*} - \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \sin 2\gamma, \\ \sigma_x &= \sigma + \frac{K \cdot \cos 2\gamma}{\cos \varphi^*} - \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \cos 2\gamma, \\ \sigma_y &= \sigma - \frac{K \cdot \cos 2\gamma}{\cos \varphi^*} + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \cos 2\gamma. \end{aligned} \quad (8)$$

На границе AD первое главное направление совпадает по направлению с осью Oy (на CD $\tau_{xy}=0$). На поверхность по границе AD действует напряжение от вышележащего слоя породы. Тогда напряженное состояние в треугольнике ABD получается следующим:

$$\tau_{xy} = 0, \quad \sigma_x = -\frac{2 \cdot K}{\cos \varphi^* - \sin \varphi^*}, \quad \sigma_y = -\rho \cdot g \cdot H. \quad (9)$$

Также предполагается, что угол θ сохраняет постоянное значение во всем треугольнике ABD и σ равняется константе.

Решения (8),(9) необходимо согласовать. Будем считать, что в плоскости xOy прямая BD разграничивает области ABD и CBD . Обозначим угол наклона прямой BD к оси Ox как β . Тогда нормаль $\bar{n}$ к BD будет $\bar{n} = (-\sin \gamma, \cos \gamma)$.

Вектор напряжения Коши на BD должен быть непрерывен по третьему закону Ньютона. Отсюда получаем два алгебраических уравнения для нахождения среднего напряжения σ и угла β .

$$\begin{cases} \frac{2 \cdot K \cdot \sin \beta}{\sin \varphi^* - \cos \varphi^*} = - \left[\sigma + \frac{K \cdot \cos 2\gamma}{\cos \varphi^*} - \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \cos 2\gamma \right] \cdot \sin \beta + \left[\frac{K \cdot \sin 2\gamma}{\cos \varphi^*} - \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \sin 2\gamma \right] \cdot \cos \beta, \\ -\rho g H \cdot \cos \beta = \left[\frac{K \cdot \sin 2\gamma}{\cos \varphi^*} - \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \sin 2\gamma \right] \cdot \sin \beta + \left[\sigma - \frac{K \cdot \cos 2\gamma}{\cos \varphi^*} + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* \cdot \cos 2\gamma \right] \cdot \cos \beta. \end{cases} \quad (10)$$

Уравнения (10) есть однородная система двух уравнений для определения двух неизвестных величин: среднего напряжения σ в области CBD и угла β (угла наклона BD к оси Ox). Для существования решения необходимо, чтобы определитель системы (10) был равен нулю. Приравняв определитель нулю, получаем квадратное уравнение для определения σ , решая которое находим корни:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1}{K} &= \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot (\cos 2\gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* - 1) \cdot ((\cos \varphi^* - \sin \varphi^*) - \sqrt{1 - \sin 2\varphi^*})}{2 \cdot (\cos \varphi^* - \sin \varphi^*) \cdot (1 - (\operatorname{tg} \varphi^*)^2)} \\ \frac{\sigma_2}{K} &= \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot (\cos 2\gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* - 1) \cdot ((\cos \varphi^* - \sin \varphi^*) + \sqrt{1 - \sin 2\varphi^*})}{2 \cdot ((\sin \varphi^* \operatorname{tg} \varphi^*)(\operatorname{tg} \varphi^* - 1) + (\cos \varphi^* - \sin \varphi^*))} \end{aligned} \quad (11)$$

Угол β определяется через $\operatorname{tg} \beta$, вычисляемый на основе любого из уравнений (10):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma \cdot \sin 2\gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* - \frac{K \cdot \sin 2\gamma}{\cos \varphi^*}}{\sigma \cdot (\cos 2\gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi^* - 1) + \frac{2K}{\cos \varphi^* - \sin \varphi^*} - \frac{K \cdot \cos 2\gamma}{\cos \varphi^*}} \quad (12)$$

Для вычисления нормального давления σ_n на CD , исходим из формул (4),(8). Откуда находим σ_n .

$$\sigma_n = \frac{\sin 2\gamma \cdot (\sigma \cdot (\cos \varphi^* + \sin \varphi^*) - k)}{\cos \varphi^*} \quad (13)$$

При известной площади с учетом (13) можно найти искомое усилие, зная которое можно приступить к определению энергетических параметров ударного механизма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ на ПМ № 156648. Устройство для изменения направления движения пневмоударной машины / Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Сырямин Н.Д., Чещин Д.О. – БИ №31 от 10.11.2015 г.
2. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. – Новосибирск: Институт горного дела СО АН СССР, 1990. – 218 с.
3. Белобородов В.Н., Изотов А.С., Исаков А.Л., Земцова А.Е. Исследование процесса разрушения тонкостенных труб коническими расширителями // ФТПРПИ. – 1997. – №6.
4. Чанышев А.И., Ефименко Л.Л., Лукьяшко О.А. Задача о предельной нагрузке для отвала горных пород при разработке полезных ископаемых // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – №2. – С.168-173.
5. Соколовский В.В. Теория пластичности. – 3-е изд. – М.: Высш.шк., 1969. – 608 с.
6. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 121 с.

© Б. Б. Данилов, А. И. Чанышев, Д. О. Чещин, 2017

ОТЫСКАНИЕ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОГО НАГРЕВА В МАССИВЕ ПОРОД ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЕЕ ГРАДИЕНТА НА ПОВЕРХНОСТИ

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, тел. (383)335-97-50; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ольга Евгеньевна Белоусова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Ирина Владимировна Фролова

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, старший преподаватель кафедры математики и естественных наук, тел. (383)243-94-75, e-mail: sten9@rambler.ru

В угольных массивах возникают эндогенные пожары. Для отыскания источников возгорания требуются методы определения их положения и интенсивности. С этой целью предлагается на поверхности массива проводить измерения температуры и градиента температуры. Оказывается, что по этим данным возможно установить координаты и мощность источника теплового нагрева внутри массива пород. Для иллюстрации используется стационарное уравнение теплопроводности в плоском случае и его аналитическое и численное решения. Устанавливается характер неограниченного поведения источников нагрева и способы их выделения в численных расчетах.

Ключевые слова: положение и интенсивность источника возгорания, уравнение теплопроводности, численные и аналитические решения.

IDENTIFICATION OF A THERMAL HEATING SOURCE IN A ROCK MASS FROM THE DATA ON TEMPERATURE AND ITS GRADIENT MEASUREMENTS AT ROCK MASS SURFACE

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Researcher, tel. (383)335-97-50, e-mail: belousova_o@ngs.ru

Irina V. Frolova

Novosibirsk State University of Economics and Management, 630099, Russia, Novosibirsk, 52 Kamenskaya St., Senior Lecturer, Chair of Mathematics and Natural Sciences, tel. (383)243-94-75, e-mail: sten9@rambler.ru

Endogenic fires used to occur in coal masses. The methods to identify fire location and its intensity are required to find an ignition source. It is proposed to make measurements of temperature

and temperature gradient at a rock mass surface. These data are appeared helpful to establish coordinates and intensity of a heat source inside a rock mass. The researchers apply the stationary heat-conductivity equation in a plane case, its analytical and numerical solutions to illustrate the above statement. The character of unlimited behavior of heating sources and methods for their singling out in numerical calculations are found.

Key words: location and intensity of ignition source, heat-conductivity equation, numerical and analytical solutions.

Пожары – эндогенные, экзогенные. Эндогенные пожары происходят при сочетании трех факторов, благоприятствующих самовозгоранию веществ и материалов: микробиологического, химического, теплового. При этом наиболее важным является тепловой, который при высоких значениях температуры является ускорителем биологических и химических процессов. Говоря об экзогенных пожарах, то его возникновение обязано внешним источникам тепла, таким как неисправное электрооборудование, несоблюдение правил ведения горных работ и т.д. В любом случае при тушении пожара необходимо установить очаг возгорания, его размеры и способы тушения.

Существуют различные способы нахождения очагов пожара. Один из них состоит в бурении шпуров и измерении концентрации газообразных продуктов горения, измерении депрессий тепловой и естественной тяг, измерении относительной влажности воздуха и т.д. Основными недостатком этого метода являются невысокая надежность и значительная трудоемкость.

Ниже предлагается другой способ, предполагающий измерение на поверхности нагреваемого тела одновременно двух величин – температуры и градиента. При этом желательно, чтобы измерения проводились не в одной точке, а на некоторой площади. По этой информации определяются распределение температуры внутри объекта, размеры очага пожара, система его тушения.

Постановка и решение задачи в стационарном двумерном случае.

Для всех тепловых процессов справедливо уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u + f(r, t), \quad (1)$$

где a^2 - коэффициент теплопроводности, $\Delta = \nabla^2$ - оператор Лапласа, $f(r, t)$ - функция тепловых источников (если $f(r, t) = 0$, то система теплоизолированная).

Ниже предполагаем, что $f(r, t) \equiv 0$, $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ (считаем, что температура изменяется незначительно). Далее рассматриваем случай, когда температура u зависит только от 2-х координат x, y . Тогда вместо (1) имеем уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Если воспользоваться комплексными переменными $z = x + iy$, $\bar{z} = x - iy$, то (2) переписывается в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \bar{z}} = 0. \quad (3)$$

Общее решение (3) в предположении что u - вещественная функция есть

$$u = f(z) + \overline{f(z)}. \quad (4)$$

Чтобы найти u требуется по граничным условиям восстановить $f(z)$.

Из-за простоты и практической важности будем рассматривать в качестве тела полуплоскость. Пусть на границе $y = 0$ заданы граничные значения u :

$$u|_{y=0} = 2g_1(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = 2g'_2(x) \quad (5)$$

(здесь коэффициент «2» взят для удобства дальнейшей записи решения u , $g'_2(x)$ - производная функции $g_2(x)$). По значениям (5) требуется восстановить функцию $f(z)$. Подставим (4) в (5). Имеем

$$\begin{cases} f(x) + \overline{f(x)} = 2g_1(x), \\ if'(x) - i\overline{f'(x)} = 2g'_2(x). \end{cases} \quad (6)$$

Первое уравнение в (6) продифференцируем по x и умножим на i , тогда имеем

$$if'(x) + i\overline{f'(x)} = 2ig_1(x). \quad (7)$$

Складывая второе уравнение (6) с (7), находим

$$if'(x) = i(g_1(x) - ig_2(x))'.$$

Отсюда интегрированием определяем

$$f(x) = g_1(x) - ig_2(x) \quad (8)$$

(константу интегрирования можно поместить в функцию $g_2(x)$).

Отметим, что (8) – уравнение, справедливое для всех x , при этом функции f , g_1 , g_2 - функции одного аргумента. Если вместо x подставить z , то найдем $f(z)$. Тогда

$$f(z) = g_1(z) - ig_2(z). \quad (9)$$

Очевидно, что решение u , полученное с помощью (4), удовлетворяет (3), (2). Кроме того, справедливы граничные условия (5).

В качестве примера рассмотрим следующие граничные условия:

$$\begin{cases} u|_{y=0} = 2A_1 \ln \sqrt{x^2 + H^2} - 2A_2 \operatorname{arctg} \frac{H}{x}, \\ \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{2A_1 H}{x^2 + H^2} - \frac{2A_2 x}{x^2 + H^2}, \end{cases} \quad (10)$$

полученные из условия того, что

$$f(z) = (A_1 + iA_2) \ln(z + iH). \quad (11)$$

(Как видно из (11), на глубине $y = -H$ располагается сосредоточенный источник тепла). Задача – восстановить (11), исходя из (10).

Решение . В соответствии с (10)

$$g_1(z) = A_1 \ln \sqrt{z^2 + H^2} - A_2 \operatorname{arctg} \frac{H}{z}, \quad (12)$$

$$g_2'(x) = \frac{A_1 H}{x^2 + H^2} - \frac{A_2 x}{x^2 + H^2}. \quad (13)$$

В соответствии с (8) требуется проинтегрировать (13). Отсюда

$$g_2(x) = A_1 \operatorname{arctg} \frac{x}{H} - \frac{A_2}{2} \ln(x^2 + H^2) + C, \quad (14)$$

$$g_2(z) = A_1 \operatorname{arctg} \frac{z}{H} - A_2 \ln \sqrt{z^2 + H^2} + C, \quad (15)$$

(C – вещественная константа). На основании (9)

$$f(z) = g_1(z) - i g_2(z) = (A_1 + i A_2) \ln \sqrt{z^2 + H^2} - i A_1 \operatorname{arctg} \frac{z}{H} - i A_2 \operatorname{arctg} \frac{H}{z} - i C. \quad (16)$$

Преобразуем (16), воспользуемся соотношением между арктангенсом и логарифмической функцией, взятым из [1]:

$$\operatorname{arctg} V = -\frac{i}{2} \ln \frac{1 + iV}{1 - iV}. \quad (17)$$

Подставляя (17) в (16) находим, что

$$\begin{aligned} f(z) &= (A_1 + i A_2) \frac{1}{2} \ln[(z + iH)(z - iH)] - \frac{1}{2} A_1 \ln \left[(-1) \frac{(z - iH)}{(z + iH)} \right] + \\ &\frac{i}{2} A_2 \ln \left[\frac{(z - iH)}{(z + iH)} \right] - iC = (A_1 + i A_2) \ln[(z + iH)] - \frac{1}{2} A_1 \pi i = iC. \end{aligned} \quad (18)$$

Если величину C считать равной $-\frac{A_1 \pi}{2}$, то (18) в точности совпадает с (11). Таким образом, тестовая задача решена. По предложенному алгоритму решаются другие задачи, имеющие практический интерес. Ниже рассматривается численная схема решения задачи.

Пусть на границе полуплоскости заданы условия (5). То есть задана температура при $y = 0$. Чтобы найти значение u на шаге -1 , то есть при погружении вниз от границы полуплоскости $y = 0$ на шаг h , воспользуемся вторым граничным условием (5):

$\frac{u_{-1} - u_0}{-h} = 2g_2'(x)$. Из него следует $u_{-1} = u_0 - 2g_2'(x)h$. Чтобы опуститься еще ниже, воспользуемся (2) в виде

$$\frac{u_{i,j-2} - 2u_{i,j-1} + u_{i,j}}{h^2} = -\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2}, \text{ где } j = 0, 1, \dots$$

Отсюда находим $u_{i,j-2}$. Очевидно, что при приближении к особой точке, как в тестовом примере с координатами $x=0$, $y=-H$, численное решение может возрастать по модулю. Чтобы ограничить решение в подобной ситуации необходимо общее решение u (или $f(z)$) искать в виде суммы двух решений):

$$u = u_1 + u_2, \quad f(z) = f_1(z) + f_2(z),$$

где $f_1(z)$ - это решение вида (11), и $u_1 = f_1(z) + \overline{f_1(z)}$. Тогда для определения функций u_2 , $f_2(z)$ будем иметь задачу без особенностей. Граничные условия для функции $u_2 = u - u_1$ определяются вычитанием из граничных условий для функции u граничных условий для u_1 . На рис. 1, 2 представлены примерные графики граничных функций $u_1|_{y=0}$, $\frac{\partial u}{\partial y}|_{y=0}$ для (11) в виде (10) при значениях $H=1$, $A_1=-1$, $A_2=1$ и $A_2=0$.

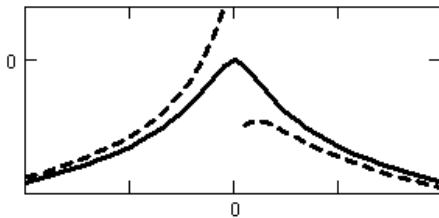


Рис. 1. График функции u_1 при значениях $H=1$, $A_1=-1$, $A_2=0$ - сплошная линия, $A_2=1$ - пунктирная линия

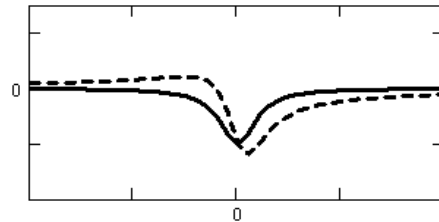


Рис. 2. График функции $\frac{\partial u}{\partial y}|_{y=0}$ при значениях $H=1$, $A_1=-1$, $A_2=0$ - сплошная линия, $A_2=1$ - пунктирная линия

Отметим, что глядя на графики изменений реальных температур и соответствующих градиентов температуры на поверхности возможно только по ним восстановить значения коэффициентов $A_1=1$, $A_2=1$, глубину H , входящих в решение (9), (11), и соответственно в (18).

Вывод: Приведен алгоритм решения задачи об определении источника тепла в нагреваемом теле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1978. - 277с.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, И. В. Фролова, 2017

ПРЕДЕЛЬНАЯ НАГРУЗКА ПРИ КОСОМ ВНЕДРЕНИИ КЛИНОВИДНОГО ИНСТРУМЕНТА В ПЕРВОНАЧАЛЬНО АНИЗОТРОПНУЮ ПОЛУПЛОСКОСТЬ

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, тел. (383)335-97-50; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Геннадий Михайлович Подыминогин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: podymnogin@gmail.com

Рассматривается первоначально изотропная среда, пределы пластичности, деформационная теория пластичности, основанные на применении собственных тензоров упругости (модель Чанышева А.И.), клиновидный инструмент, внедряемый в среду под некоторым углом. В рамках жестко - пластической схемы находится предельная нагрузка. Исследуется влияние первоначальной анизотропии, угла заточки инструмента, угла внедрения инструмента на предельную нагрузку.

Ключевые слова: пластичность, предельная нагрузка, анизотропия, косое внедрение.

ULTIMATE LOAD AT ANGULAR PENETRATION OF A WEDGE-SHAPED TOOL INTO INITIALLY ANISOTROPIC SEMI-PLANE

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Deputy Director for Science; Novosibirsk State University of Economics and Management, 630099, Russia, Novosibirsk, 52 Kamenskaya St., Professor, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Gennady M. Podymnogin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)335-97-50, e-mail: podymnogin@gmail.com

The initially isotropic medium, plasticity limits, deformation theory of plasticity are discussed based on the own elasticity tensors (A.I. Chanyshev's model); a wedge-shaped tool penetrates at a certain angle into a medium. The ultimate load is within the frame of the rigidly-plastic scheme. The influence of initial anisotropy, cutting edge angle, angle of tool penetration on the ultimate load is investigated.

Key words: plasticity, ultimate load, anisotropy, angular penetration.

Рассматривается первоначально анизотропная среда с законом Гука вида

$$\begin{cases} \varepsilon_x = a_{11}\sigma_x - a_{12}\sigma_y, \\ \varepsilon_y = -a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y, \\ \varepsilon_{xy} = a_{33}\tau_{xy}, \end{cases} \quad (1)$$

где xOy – исходная система координат, изображенная на рис. 1, a_{ij} – упругие податливости (константы материала), ε_{ij} – деформации, τ_{ij} – напряжения.

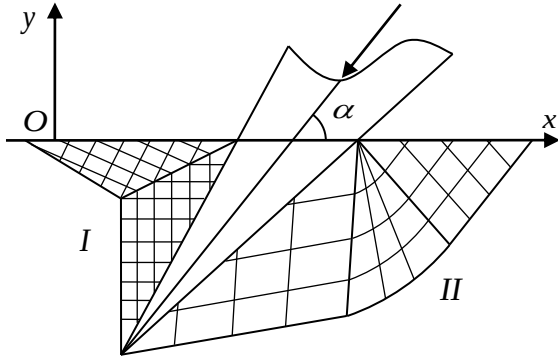


Рис. 1. Косое внедрение клина в полуплоскость

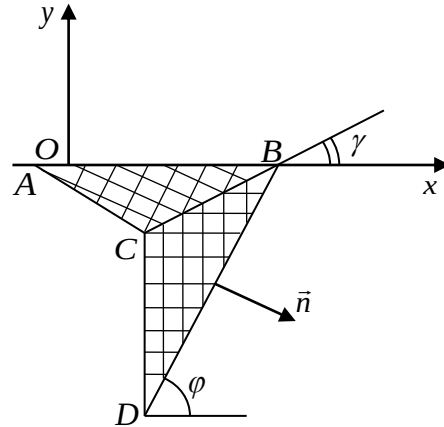


Рис. 2. Структура области I

В такую среду под некоторым углом α внедряется жесткий клин. Требуется найти предельную нагрузку для внедрения клина, необходимые условия для этого, определить зависимость предельной нагрузки от влияния первоначальной анизотропии, то есть от значений констант a_{ij} .

Решение задачи. Прежде всего, определим уравнение пластического деформирования среды (1) с использованием [1]. Для этого введем в рассмотрение тензоры напряжений $T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix}$, деформаций $T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y \end{pmatrix}$ и тензорный базис вида:

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, T_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, T_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Очевидно, что базис (2) является ортонормированным и ортогональным, если учесть, что скалярное произведение тензоров, например T_σ, T_ε , определяется соотношением [2]:

$$(T_\sigma, T_\varepsilon) = \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

где по повторяющимся индексам ведется суммирование. Для базиса (2) координаты тензоров T_σ, T_ε в нем равны

$$S_1 = \sigma_x, S_2 = \sigma_y, S_3 = \sqrt{2} \cdot \tau_{xy}, S_3 = \sqrt{2} \cdot \tau_{xy}, \Omega_1 = \varepsilon_x, \Omega_2 = \varepsilon_y, \Omega_3 = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_{xy}. \quad (4)$$

В координатах (4) закон Гука (1) записывается в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} & 0 \\ -a_{12} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

или $\vec{\Omega} = A\vec{S}$.

Так как матрица A – симметрическая, то ее собственные числа вещественные и равны:

$$\lambda_1 = \frac{a_{11} + a_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{a_{11} - a_{22}}{2}\right)^2 + a_{12}^2}, \lambda_2 = \frac{a_{11} + a_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{a_{11} - a_{22}}{2}\right)^2 + a_{12}^2}, \lambda_3 = a_{33} \quad (5)$$

Собственные векторы матрицы A определяются как

$$\vec{b}_1 = (\cos(\beta/2), -\sin(\beta/2), 0), \vec{b}_2 = (\sin(\beta/2), \cos(\beta/2), 0), \vec{b}_3 = (0, 0, 1), \quad (6)$$

где

$$\operatorname{tg} \beta = 2a_{12} / a_{11} - a_{22}. \quad (7)$$

С применением (6), (7), (2) находим собственные тензоры закона Гука (1):

$$T_1^C = \begin{pmatrix} \cos(\beta/2) & 0 \\ 0 & -\sin(\beta/2) \end{pmatrix}, T_2^C = \begin{pmatrix} \sin(\beta/2) & 0 \\ 0 & \cos(\beta/2) \end{pmatrix}, T_3^C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Многочисленные исследования по металлам, например [3], подтверждают такой факт, что собственные тензоры упругости являются собственными тензорами в пластичности. В [4] показывается, что этот факт является следствием того, что среда имеет определенную структуру и все процессы деформирования происходят в этой (одной и той же для всех процессов) структуре. Поскольку структура определяется собственными тензорами, то по этой причине их можно считать собственными для любых процессов.

Применим этот результат к (1). Запишем возможные критерии пластичности. Их выражения будут зависеть от кратности корней (5) характеристического уравнения $|A - \lambda E| = 0$.

Пусть $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$. Если возможное направление пластических деформаций в тензорном пространстве – направление орта T_1^C , то тогда условием пластичности будет выражение:

$$|S_1^C| = |\sigma_x \cdot \cos(\beta/2) - \sigma_y \cdot \sin(\beta/2)| = S_1^0, \quad (9)$$

где S_1^0 – критерий пластичности, определяется экспериментально.

Другое направление пластических деформаций может быть связано со скольжением материала вдоль плоскостей xy , yx . Тогда пластическое течение в тензорном пространстве происходит вдоль орта T_3^C . В качестве условия пластичности получаем

$$|S_3^C| = \sqrt{2} \cdot |\tau_{xy}| = S_3^0, \quad (10)$$

где S_3^0 – критерий пластичности, определяется также экспериментально.

Другое условие пластичности может быть в случае $\lambda_1 = \lambda_3$, которое формулируется в виде:

$$\sqrt{(S_1^C)^2 + (S_3^C)^2} = \sqrt{(\sigma_x \cdot \cos(\beta/2) - \sigma_y \cdot \sin(\beta/2))^2 + 2\tau_{xy}^2} = \sqrt{2}K, \quad (11)$$

где $\sqrt{2}K$ – критерий пластичности в плоскости S_1^C, S_3^C , являющийся радиусом окружности, определяется экспериментально.

Попытаемся в рамках этих представлений решить задачу о внедрении жесткого гладкого клина в полуплоскость, изготовленную из материала (1).

Для определенности примем то, что имеет место третий случай кратности корней характеристического уравнения, то есть материал в пластичности имеет предел упругости (11).

Для решения задачи имеем уравнения равновесия:

$$(\partial\sigma_x/\partial x) + (\partial\tau_{xy}/\partial y) = 0, \quad (\partial\tau_{xy}/\partial x) + (\partial\sigma_y/\partial y) = 0 \quad (12)$$

и условие пластичности (11), переписанное в виде

$$\sigma_x \cdot \cos(\beta/2) - \sigma_y \cdot \sin(\beta/2) = -\sqrt{2}K \cdot \sin 2\Theta, \quad \tau_{xy} = K \cos 2\Theta, \quad (13)$$

где 2Θ – некоторая неизвестная функция координат x, y . Кроме 2Θ введем в рассмотрение еще функцию $\sigma = \sigma(x, y)$ как

$$\sigma_x \cdot \sin(\beta/2) + \sigma_y \cdot \cos(\beta/2) = \sigma. \quad (14)$$

Из (13), (14) следует, что

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma \cdot \sin(\beta/2) - \sqrt{2}K \cdot \cos(\beta/2) \cdot \sin 2\Theta, \\ \sigma_y &= \sigma \cdot \cos(\beta/2) + \sqrt{2}K \cdot \sin(\beta/2) \cdot \sin 2\Theta, \quad \tau_{xy} = K \cos 2\Theta. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя (15) в (12), получаем статически определяемую задачу для определения Θ, σ . Из полученной системы находим характеристики

$$\lambda_{1,2} = \left(-\operatorname{ctg} 2\Theta \pm \sqrt{\operatorname{ctg}^2 2\Theta + \sin \beta} \right) / (\sqrt{2} \sin(\beta/2)) \quad (16)$$

и соотношения на них в виде:

$$\sigma - K\sqrt{2} \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot \sin 2\Theta \mp K\sqrt{2} \cdot E(2\Theta, \kappa) / \sin \beta = \xi_1, \xi_2, \quad (17)$$

где $E(2\Theta, \kappa)$ – эллиптический интеграл 2-ого рода:

$$E(2\Theta, \kappa) = \int_0^{2\Theta} \sqrt{1 - \kappa \sin^2 t} \cdot dt, \quad \kappa = 1 - \sin \beta,$$

ξ_1, ξ_2 – постоянные вдоль характеристик.

Отметим, что произведение угловых коэффициентов характеристик на основании (16) равно $-\operatorname{ctg}(\beta/2)$.

Далее решается задача для клина. Имеем две области деформирования: I и II , изображенные на рис. 1. В области II имеем две области простых напряженных со-

стояний, соединенных между собой центрированным полем. В области I имеем два простых напряженных состояния, отделенных друг от друга линией сильного разрыва.

Рассмотрим более подробно область I , изображенную отдельно на рис. 2.

Имеем треугольники ACB и DCB на рис. 2, прямая CB – граница раздела треугольников, угол наклона прямой CB к оси Ox как угол γ .

Предполагаем, что в треугольнике ACB реализуется простое напряженное состояние, в котором

$$\sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0, \sigma_x = -\sqrt{2}K \cdot \cos(\beta/2), \quad (18)$$

Характеристики здесь имеют уравнения $dy/dx = \pm \sqrt{\operatorname{ctg}(\beta/2)}$, через них и граничные условия на ОВ определяется решение (18).

Далее рассматривается треугольник DCB . Нормаль $\vec{n}$ к стороне клина DB составляет с осью x угол $\frac{\pi}{2} - \varphi$, то есть $\cos(n, x) = \sin \varphi$, $\cos(n, y) = -\cos \varphi$.

Предполагается, что в треугольнике DCB также реализуется простое напряженное состояние с постоянными напряжениями σ_x , σ_y , τ_{xy} , удовлетворяющими условиям: касательное усилие τ_n на грани клина DB равно нулю (клин – гладкий), на линии CB вектор напряжений $\vec{p}_{CB}$ непрерывен, выполняется критерий (11). Неизвестными величинами при этом считаются: угол γ , значение σ . Как результат имеем три уравнения для определения трех неизвестных напряжений.

По найденным значениям σ и γ в треугольнике DCB и, следовательно, на границе DB находим значение σ_n на границе DB . То есть определяется нормальное усилие на грани клина DB и сама сила $\vec{F}_{DB} = \sigma_n DB \vec{n}$, необходимая для осуществления деформаций на рис. 2.

Что касается области II на рис. 1, то решение в ней строится аналогично классическому, приведенному, например, в [2].

В работе приводятся значения тех и других сил на гранях клина, исследуется влияние параметра β , угла α , угла φ , раствора угла клина на значения предельных нагрузок.

Выводы.

Решена задача о внедрении жесткого гладкого клина в первоначально анизотропную среду. Определены зависимости глубины внедрения клина от угла подачи инструмента, от параметров первоначальной анизотропии среды, от раствора угла внедряемого клина.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чанышев А. И. О пластичности анизотропных сред // ПМТФ — Новосибирск, 1984. — Вып. 2. — С. 149—151.
2. Качанов Л.М. Основы теории пластичности — М.: Наука, 1969. — 420 с.
3. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. — М.: Недра, 1979. — 301 с.
4. Чанышев А.И., Абдулин И.М. Деформирование и разрушение первоначально изотропных сред с условием нарушения прочности Мизеса // ФТПРПИ.-2006.-№4.-с. 17-30.

© А. И. Чанышев, Г. М. Подыминогин, 2017

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА ДЛЯ РАСШИРЕННОГО ДИАПАЗОНА РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ

Владимир Владимирович Тимонин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией бурения и технологических импульсных машин ИГД, тел. (383)205-30-30, доп. 199, e-mail: timonin@misd.ru

Сергей Евгеньевич Алексеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)205-30-30, доп. 205, e-mail: Alex@misd.ru

Даньяр Иванович Кокоулин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)205-30-30, доп. 208, e-mail: konstruktor430@yandex.ru

Описаны особенности погружных пневмоударников для бурения скважин в породах средней и высокой крепости. Рассмотрены некоторые конструктивные элементы этих машин. Рассмотрена специфика работы пневмоударников на различном рабочем давлении. Показаны возможности повышения мощности пневмоударников при работе на малом давлении энергоносителя. Приведены примеры конкретного исполнения системы воздухораспределения и некоторые результаты ее исследования.

Ключевые слова: скважина, система воздухораспределения, схема, давление, мощность, энергоноситель, энергия удара, надежность, рабочая площадь, ударник.

THE AIR-DISTRIBUTION SYSTEM IN DOWNHOLE AIR HAMMER WITH EXPANDED OPERATING PRESSURE RANGE

Vladimir V. Timonin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Laboratory for Drilling and Technological Impulse-Forming Machines, tel. (383)205-30-30, extension 199, e-mail: timonin@misd.ru

Sergey E. Alekseev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 205, e-mail: Alex@misd.ru

Daniar I. Kokoulin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)205-30-30, extension 208, e-mail: konstruktor430@yandex.ru

Specific features of downhole air hammers to make holes in medium- and high-hardness rocks are described. Structural members of these devices and peculiarities of air-hammer operation

under different working pressures are considered. The potential feasible increase in air-hammer performance with the use of a small-pressure energy carrier is substantiated. The case study where the air-distribution system is employed and the research data on its operation are reported.

Key words: borehole, air-distribution system, diagram, pressure, capacity, energy-carrier, impact energy, reliability, working area, percussion.

Важнейшей составляющей технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, их добычи, как подземным, так и открытым способами является бурение скважин в породном массиве.

В настоящий момент и в обозримом будущем наиболее эффективным способом проходки скважин в массиве горных пород является ударно-вращательный, обеспечивающий бурение с минимальной энергоемкостью [1,2]. Для его реализации на горных предприятиях, как в России, так и за рубежом, получили погружные, т.е. взаимодействующие непосредственно с забоем скважины, машины ударного действия – погружные пневмоударники. Они применяются в качестве рабочего органа бурового станка, который через систему штанг осуществляет подвод энергоносителя, передачу осевого усилия и вращающего момента.

Анализ развития пневмоударного бурения за период более полувека, начиная с момента его возникновения, выявил тенденцию повышения давления используемого сжатого воздуха. Ведущие зарубежные фирмы достаточно давно перешли на применение энергоносителя повышенного давления, составляющее тогда 0,9 – 1,8 МПа [3]. В настоящее время конструкции пневмоударников повышенного давления и коронок продолжают совершенствоваться, продолжается дальнейшее наращивание рабочего давления. Так пневмоударник шведской фирмы Atlas Copco COP 64 для проходки скважин диаметром 156 – 178 мм работает на давлении 1,2 – 2,5 МПа.

С изменением давления используемого сжатого воздуха меняются и конструкции погружных пневмоударников. Изменяются система воздухораспределения, конструкции отдельных деталей, технология изготовления, марки применяемых материалов. Образуется иной рабочий цикл. К конструктивным особенностям машин, работающих на высоком давлении сжатого воздуха можно отнести: их закрытый тип, т.е. без перфораций стенок корпуса, выхлоп всего отработанного воздуха на забой скважины, беззолотниковую систему воздухораспределения [4].

Россия явилась пионером создания и использования погружных пневмоударных машин, но в данный период времени, в силу различных причин, существенно отстает в освоении высокого давления энергоносителя, поэтому данная тема весьма актуальна.

В настоящее время использование энергоносителя повышенного давления более доступно на открытых работах. Питание пневмоударника здесь осуществляется от автономного источника, в качестве которого может быть использован компрессор высокого давления. Затраты на переоборудование буровой техники в данном случае относительно не велики. Однако для работы на повышенном давлении сжатого воздуха требуются специальные конструкции пневмоударников и коронок.

Отечественные буровые установки типа УРБ-2А2, используемые для бурения геологоразведочных, гидрогеологических скважин, а также скважин иного назначения могут снабжаться компрессорами высокого давления. Например, применяется компрессор СД 15/25, производительностью 15 м³/мин, создающий давление

2,5 МПа. При пневмоударном бурении этими станками используются импортные пневмоударники высокого давления и коронки.

Все большее распространение в России получают зарубежные буровые станки, работающие на высоком давлении сжатого воздуха. Однако стоит отметить высокую стоимость импортных пневмоударников и коронок, имеющую тенденцию к дальнейшему увеличению. Актуальна разработка отечественных импортозамещающих конструкций.

В ИГД СО РАН установлено, что для создания пневмоударника, не уступающего известным аналогам или превосходящего их, он должен иметь систему воздухораспределения с ударной парой: буровое долото – ударник, приближенно равных масс и равных акустических сечений с максимально возможным использованием рабочих площадей сечения по наружному диаметру пневмоударника. Реализация этого принципа в конкретных конструктивных схемах, а затем и в реальных конструкциях позволит ликвидировать отставание в этой области от конкурентов.

Для реализации этого положения разработана принципиальная схема погружного пневмоударника с простой формой ударника, не имеющего внутренних каналов, что увеличивает надежность его работы [5, 6, 7] (рис. 1). По данной схеме создан погружной пневмоударник П110ГМ для работы на станках высокого давления.

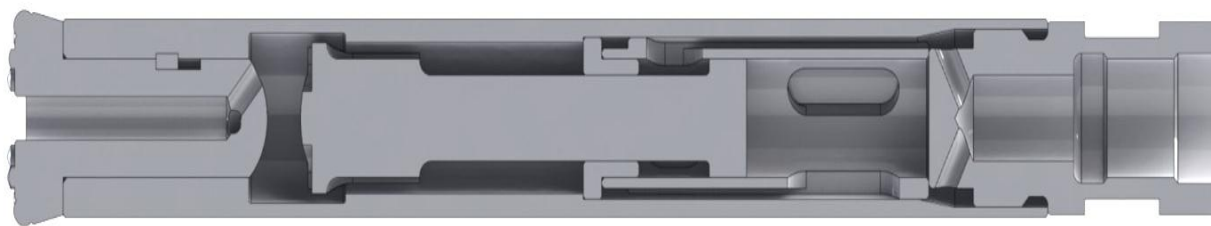


Рис. 1. Схема погружного пневмоударника повышенного давления

В пневмоударниках повышенного давления вопрос повышения среднего давления в рабочих камерах решается повышением магистрального давления. В этом случае использование бесклапанной системы воздухораспределения вполне обосновано. Однако в России достаточно много работ, на которых использование энергоносителя повышенного давления ограничено. Для возможности использования пневмоударника П110ГМ на низком давлении сжатого воздуха он должен обладать достаточной универсальностью. Необходимо, чтобы при работе на давлении 0,6 МПа он имел энергетические параметры не меньшие, чем у пневмоударника обычного давления.

Представляет интерес для повышения параметров использовать кольцевой эластичный клапан [8, 9].

Конструкция пневмоударника позволяет достаточно просто, не уменьшая его преимуществ, в систему воздухораспределения ввести эластичный клапан, позволяющий повысить среднее давление в рабочих камерах при работе на низком давлении и тем самым увеличит энергетические параметры (рис. 2).

В начале холостого хода ударник 2 ввиду перепада давлений в полостях до и после эластичного клапана 9 клапан растянут и зазора между ним и гильзой 3 не существует, и поступления сжатого воздуха в рабочие камеры 4 и 5 нет, ударник совершает движение. В дальнейшем через каналы в гильзе 3 и камеру 6 происходит выпуск в рабочие камеры 4 и 5 и давление до и после эластичного клапана выравнивается. Под действием упругих сил клапан сжимается и образуется зазор между ним и гильзой, что создает дополнительный канал подачи сжатого воздуха в рабочие камеры. Под действием сжатого воздуха со стороны рабочих камер ударник останавливается и переводится на рабочий ход. В начале рабочего хода в рабочие камеры сжатый воздух поступает как через каналы в гильзе, так и через зазор между эластичным клапаном и гильзой. В дальнейшем каналы в гильзе разъединяются с рабочими камерами, поступление сжатого воздуха происходит только через зазор между клапаном и гильзой, что продлевает период впуска и увеличивает среднее давление в рабочих камерах. При дальнейшем движении ударника открывается выхлоп из рабочих камер через расточку 7 в корпусе 1 и канал в буровой коронке 8 на забой скважины. Во время выхлопа давление в рабочих камерах падает и образуется перепад давлений до и после эластичного клапана, под действием которого он растягивается и перекрывает зазор между ним и гильзой. В конце рабочего хода ударник наносит удар по хвостовику буровой коронки.

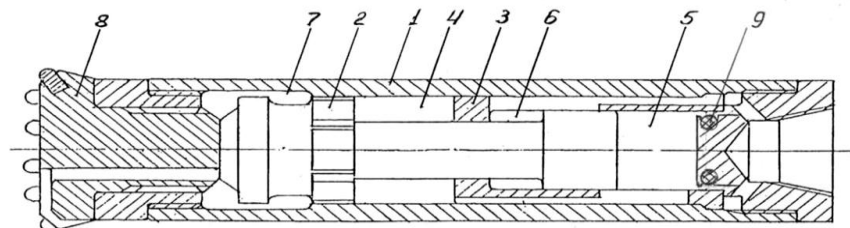


Рис. 2. Принципиальная схема пневмоударника П110ГМ с эластичным клапаном:

1 – корпус; 2 – ударник; 3 – воздухораспределительная гильза; 4 – кольцевая полость камеры рабочего хода; 5 – торцевая камера рабочего хода; 6 – камера холостого хода постоянного давления; 7 – расточка; 8 – буровая коронка; 9 – эластичный клапан.

Был изготовлен экспериментальный образец пневмоударника П110ГМ для работы на энергоносителе расширенного диапазона давления (0.6 – 1.6 Мпа). Он имел настройку бесклапанного типа для работы на повышенном давлении и настройку с эластичным клапаном для работы на низком давлении. Эти настройки были исследованы на лабораторном вертикальном испытательном стенде ГД-251 и записью диаграмм давлений в рабочих камерах (рис. 3).

На диаграммах видно, что на записи «б» импульс со стороны камер рабочего хода существенно больше, чем на записи «а», в чем проявляется работа эластичного клапана.

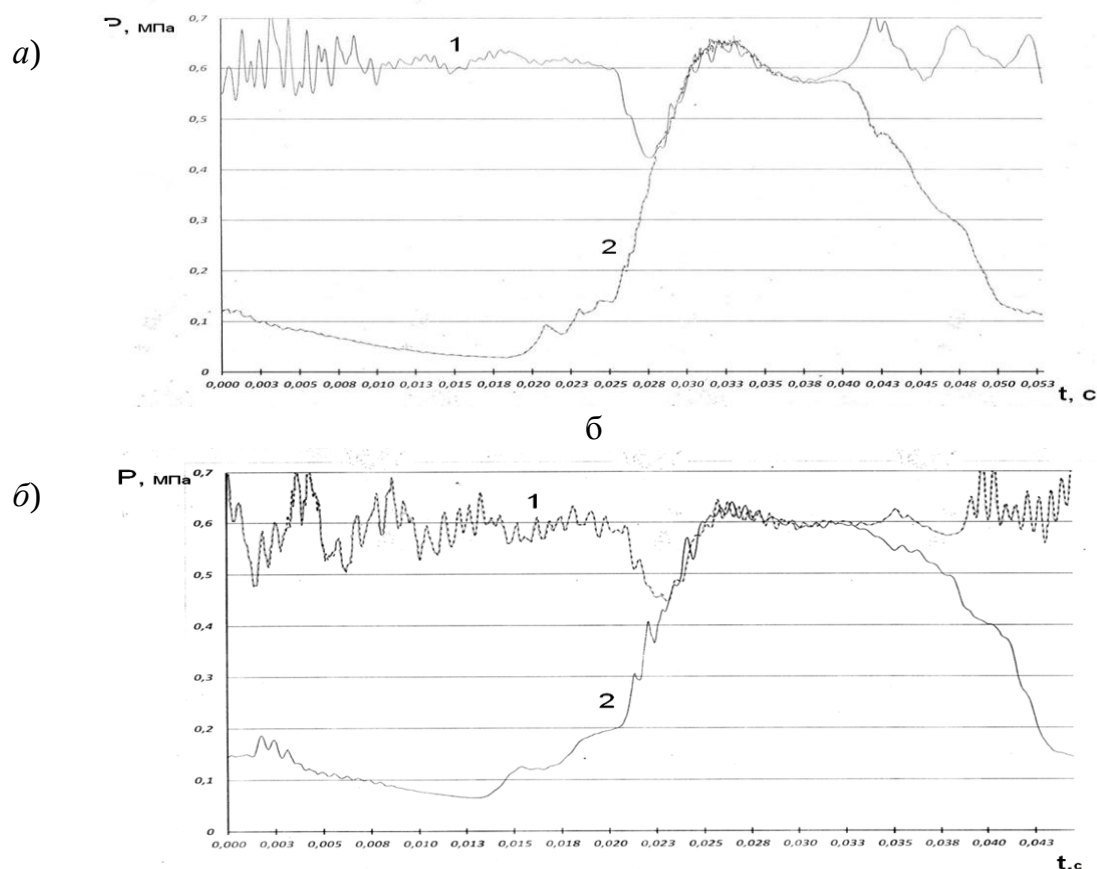


Рис. 3. Диаграммы давлений в рабочих камерах пневмоударника П110ГМ:

а) без клапана; б) с эластичным клапаном; 1 – давление в камере холостого хода; 2 – давление в камерах рабочего хода.

При обработке диаграмм по известной методике [10] были определены параметры пневмударника с различной настройкой, которые представлены в таблице.

Таблица

Параметры пневмударника П110ГМ

Параметры	П110ГМ без клапана	П110ГМ с клапаном
Наружный диаметр корпуса, мм	98	
Длина (без коронки), мм.	590	
Масса ударника, кг.	5.47	
Давление воздуха, МПа	0.6	
Энергия удара, Дж.	107.5	135
Частоты ударов, мин ⁻¹	1133	1346.8
Ударная мощность, кВт.	2.03	3.03

Таким образом, принципиальная схема пневмоударника П110ГМ позволяет использовать эластичный клапан для повышения энергетических параметров с сохране-

нием преимуществ этой машины, а именно закрытый тип с выхлопом всего отработанного воздуха на забой скважины для наилучшей очистки его от буровой мелочи и лучшей износостойкости. Использование клапана в данной схеме осуществляется впервые. Энергия единичного удара увеличилась при работе на давлении 0.6 МПа на 25 %, частота ударов на 19 %, а ударная мощность в целом в 1.5 раза. Это позволяет эффективно использовать пневмоударник. как при работе на повышенном давлении энергоносителя, так и при работе на обычном давлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондратенко А.С. Перспективы направленного бурения прочных горных пород / Кондратенко А.С., Тимонин В.В., Патутин А.В. // ФТПРПИ. – 2016. - № 1. С. 124 – 131.
2. Тимонин В.В. Средства прямолинейно направленного бурения в условиях угольных шахт / Тимонин В.В., Кокоулин Д.И., Алексеев С.Е., Кубанычбек.Б. // конференция ИГД СО РАН «Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности», Новосибирск, 2016. – С. 168 – 172.
3. Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.Е., Попелюх А.И., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ – ФТПРПИ. - № 5. - 2014. – С. 157 – 167.
4. Репин А.А., Алексеев С.Е. Направления развития погружных пневмоударников // Фундаментальные проблемы формирования техногенной среды. Т II. Машиноведение. - Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 30 – 39.
5. Пат. 2090730 РФ: МПК7 E21B 4/14, E21C 3/24 Погружной пневматический ударный механизм / С.Е. Алексеев; ИГД СО РАН. - № 95107596/03; заяв. 11.05.95; опубл. 20.09.97 в Бюл. № 26.
6. Пат. 2343266 РФ: МПК7 E21B 4/14 Погружной пневмоударник / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, Г.А. Пятнин; ИГД СО РАН. - № 2007124972/03; заявл. 02.07.2007; опубл. 10.01.2009 в Бюл. № 1
7. Полезн. модель 121854 РФ. Погружной пневмоударник. / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, В.Н. Карпов; ИГД СО РАН. - № 2012118740/03; заяв. 04.05.2012; опубл. 10.11.2012 Бюл. № 31.
8. А.с. 848 615 СССР МПК7 E21B 4/14 Пневматический ударный механизм / В.А. Гаун; ИГД СО РАН. - № 2545603/03; заявл. 10.11.1972; опубл. 23.07.1981 в Бюл. № 27.
9. Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Работа кольцевого упругого клапана в пневмоударном приводе // ФТПРПИ. – 2016. - № 1. С. 132 – 143.
10. Есин Н.Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков. Новосибирск. Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР. 1965. – 78 с.

© В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, Д. И. Кокоулин, 2017

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ
МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТАДИИ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ КУБИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ
ГЕОМАТЕРИАЛОВ ДО РАЗРУШЕНИЯ**

Ольга Михайловна Усольцева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, руководитель ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Владимир Иванович Востриков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. лабораторией горной геофизики, тел. (383)205-30-30, доп. 117, e-mail: vvi.49@mail.ru

Павел Александрович Цой

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsky@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, главный специалист, тел. (383)330-96-41, e-mail: centre@misdnsc.ru

Комплексный анализ эволюции сигналов микросейсмической эмиссии при одноосном нагружении до разрушения кубических образцов из искусственного геоматериала позволил установить взаимосвязь закономерностей изменения сигналов с уровнем нагрузки. Деформационные процессы, развитие микроповреждений, нарушение сплошности и формирование плоскости магистрального разрыва приводит к существенной трансформации спектрального состава сигналов микросейсмической эмиссии. Генерация мощных низкочастотных гармоник при нагрузках, приближающихся к пиковым, может служить предвестником выхода разрыва на поверхность и, соответственно, разрушения геоматериала.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, одноосное сжатие, геоматериал, микросейсмическая эмиссия, напряжение, деформация, разрушение.

**REGULARITIES IN VARIATIONS OF MICROSEISMIC EMISSION SIGNAL
PARAMETERS ACCORDING TO DEFORMATION STAGE IN LOADING OF
CUBIC SPECIMENS OF GEOMATERIALS UP TO FAILURE**

Olga M. Usol'tseva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of The Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical, and Geodynamic Measurements, SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Vladimir I. Vostrikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Mining Geophysics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 117, e-mail: vvi.49@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx prospect, Ph. D., Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsky@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Main Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misdnsc.ru

The integrated analysis of microseismic emission signal evolution under uniaxial failure loading of artificial geomaterial specimens enabled to establish interrelation of signal variation regularities versus a load. Deformation processes, microdefect evolution, discontinuities, and formation of the main fracture plane induce essential transformation of spectral composition of microseismic emission signals. Generation of powerful low-frequency harmonics under close-to-peak loads can serve a symptom of feasible fracturing exposure to the daylight surface with respective geomaterial failure.

Key words: laboratory test, uniaxial compression, geomaterial, microseismic emission, stress, strain, failure.

Обзор отечественной и зарубежной литературы за последние годы показывает, что имеется ряд работ, посвященных мониторингу сейсмических сигналов для исследования физико-механических свойств горных пород, а также их изменению в процессе деформирования [1 – 6].

Данная работа, как продолжение [7] посвящена исследованию эволюции сигналов микросейсмической эмиссии при одноосном нагружении до разрушения образцов из искусственного геоматериала. Проведена серия экспериментов на кубических образцах с размером ребра 200 мм (угол напластования составлял $\Psi = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) из искусственного геоматериала, описанного выше, фотографии образцов приведены на рис. 1. Испытания кубических образцов геоматериалов проводились при одноосном сжатии до разрушения со скоростью перемещения подвижного захвата 0,1 мм/мин. На 4-х боковых гранях куба устанавливалось по 4 микросейсмических датчика KD 91 для записи сигналов МСЭ. Перемещение и усилие в осевом (вертикальном) направлении регистрировалось измерительной системой пресса 8802. Перемещения в двух ортогональных горизонтальных направлениях регистрировались с помощью датчиков Solartron DP10S, расположенных в плоскости, перпендикулярной нормальному усилию. Общий вид кубического образца, установленного в захватах пресса Instron 8802, с микросейсмическими датчиками KD 91 и датчиками Solartron DP10S, приводится на рис. 2.

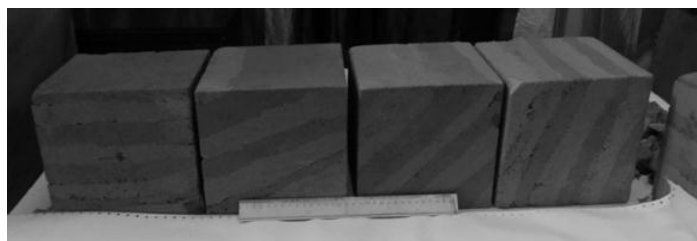


Рис. 1. Кубические образцы с размером ребра 200 мм (угол напластования составлял $\Psi = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

Предел прочности для образцов с углом напластования $\Psi = 0$ и 90° составляет $\sigma^s = 6,3$ МПа, для образцов с углом напластования $\Psi = 45^\circ$ – 4,1 МПа. На рис. 3 приведена зависимость « $P/P_{max} - t/t_m$ » при одноосном сжатии кубического образца с углом напластования $\Psi = 45^\circ$, где P/P_{max} – отношение текущего значения осевой нагрузки к максимальной P_{max} , t/t_m – отношение текущего значения времени эксперимента к значению t при $P = P_{max}$.

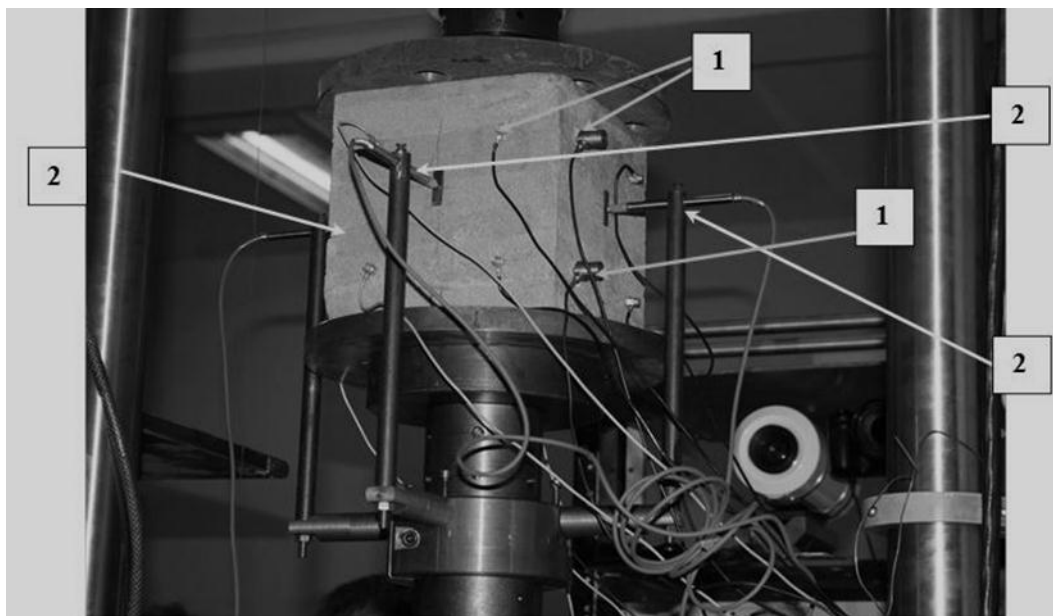


Рис. 2. Общий вид кубического образца, установленного в захватах пресса Instron 8802, с микросейсмическими датчиками KD19 (1) и датчиками перемещения Solartron DP10S (2)

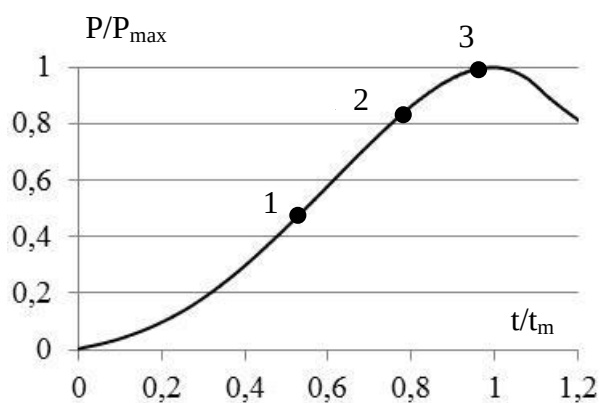


Рис. 3. Диаграмма « $P/P_{max} - t/t_{max}$ » при одноосном сжатии кубического образца с углом напластования $\Psi = 45^\circ$

Для кубических образцов было обработано большое количество микросейсмических сигналов, ниже на рис. 4 приводятся типовые сигналы, полученные для различных стадий деформирования (это точки 1, 2, 3, 4, 5, 6 на диаграмме « $P/P_{max} - t/t_{max}$ » рис. 3).

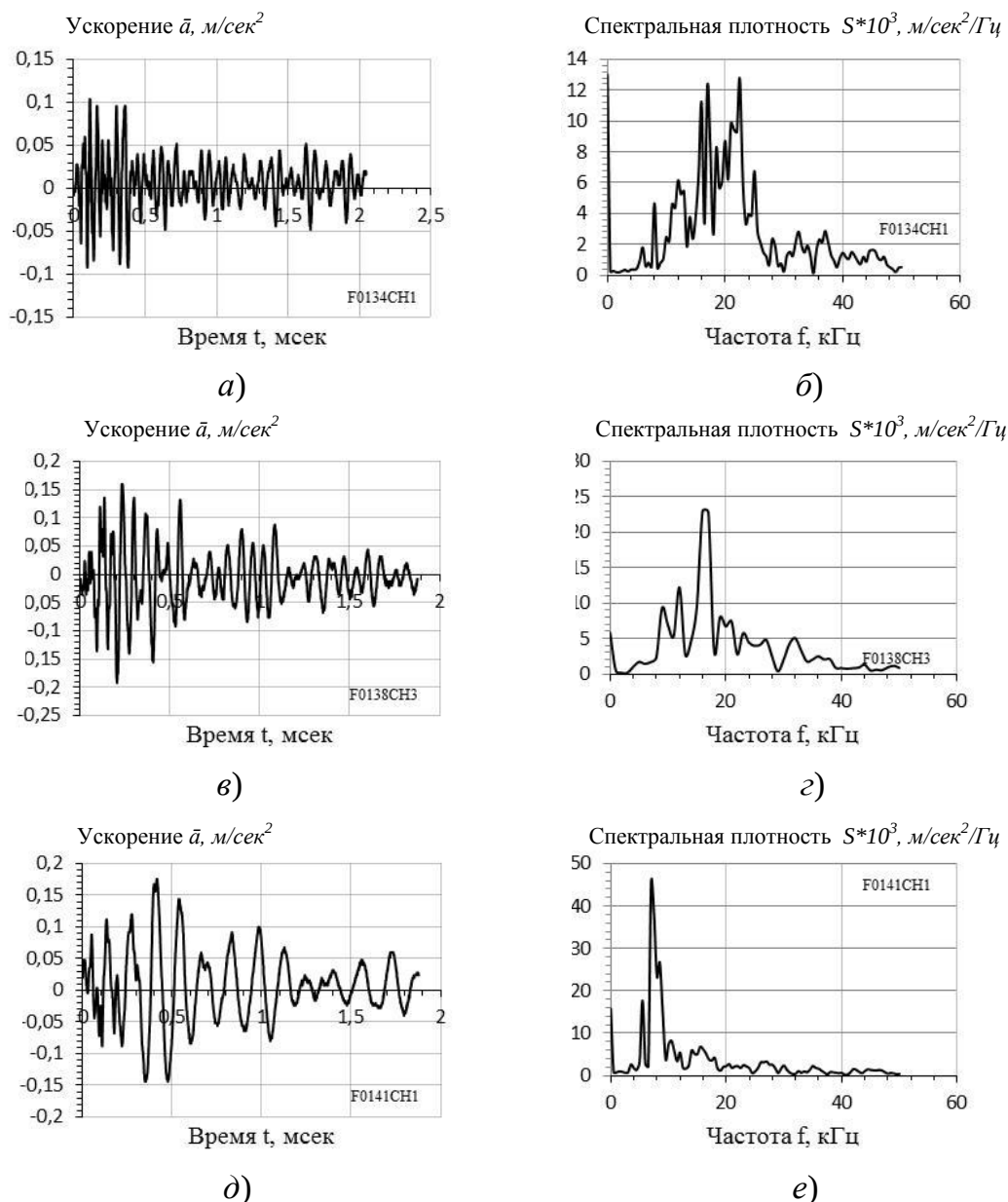


Рис. 4. Сигналы МСЭ, зарегистрированные в точках 1, 2, 3 диаграммы « $P/P_{max} - t/t_{max}$ » на рис. 9

Комплексный анализ эволюции сигналов микросейсмической эмиссии, напряжения и деформации показал, что эволюция трещинообразования в образцах геоматериала вполне удовлетворительно характеризуется каждым из методов. Кроме того, существует четкая взаимосвязь между закономерностями изменения параметров сигналов МСЭ с диаграммой «напряжение-деформация»:

На 1-й стадии нагружения при напряжениях, не превышающих 0,25-0,5 пиковой нагрузки, наблюдается незначительное количество сигналов МСЭ, сигналы по частоте широкополосные. На 2-й стадии деформирования, когда напряжение принимает значения от 0,4-0,5 до 0,7-0,8 предела прочности, количество сигналов МСЭ возрастает, возрастает их амплитуда, частотный спектр несколько сужается и смещается в сторону низких частот. На 3-й стадии деформирования при значениях напряжений от 0,8 предела прочности до пиковой нагрузки количество сигналов МСЭ возрастает в несколько раз относительно предыдущей стадии деформирования, возрастает их амплитуда, при этом частотный спектр еще более смещается в сторону низких частот, и его полоса значительно сужается. Карты пространственно-временного распределения сигналов МСЭ демонстрируют их существенно неравномерное распределение в объеме образца. Важно отметить, что место выхода магистрального разрыва на поверхность образца можно определить при нагрузках, меньших пиковой, когда образец еще сохраняет целостность.

Для кубических образцов с углом напластования $\Psi = 45^\circ$ отмеченные закономерности эволюции сигналов МСЭ выражены наиболее ярко.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-07566) на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reza Nejati H., Ghazvinian A. Brittleness Effect on Rock Fatigue Damage Evolution // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, Volume 47, Issue 5, pp. 1839-1848.
2. Seop J., Kim K.S. Lee, Cho W.J., Choi H.J., Cho G.C.. A Comparative Evaluation of Stress–Strain and Acoustic Emission Methods for Quantitative Damage Assessments of Brittle Rock // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, Volume 48, Issue 2, pp. 495-508.
3. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Ошкин Р.О.. Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2.
4. Wanga E., Jia H., Song D., Li N., Qian W. Use of ultra-low-frequency electromagnetic emission to monitor stress and failure in coal mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 70.
5. Курленя М. В., Сердюков А. С., Дучков А. А., Сердюков С. В. Волновая томография очагов аккумуляции метана в угольном пласте // ФТПРПИ. – 2014. – № 4.
6. Сердюков С. В., Азаров А. В., Дергач П. А., Дучков А. А. Аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. – 2015. – № 3.
7. Особенности развития процессов деформирования и микросейсмической эмиссии при нагружении образцов горных пород до разрушения / В. И. Востриков, О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 45–49.

© О. М. Усольцева, В. И. Востриков, П. А. Цой, В. Н. Семенов, 2017

ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕОМАТЕРИАЛОВ СО СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ОДНООСНОМ И ОБЪЕМНОМ СЖАТИИ

Ольга Михайловна Усольцева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, зав. ЦКП ГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Павел Александрович Цой

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, главный специалист, тел. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

Борис Борисович Сиволан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий инженер, тел. (383)330-96-41, e-mail: bor.nsk.ru@mail.ru

Приводятся закономерности влияния угла напластования на деформационно-прочностные квазистатические и упругие динамические характеристики образцов геоматериалов со структурой двух типов – сплошными и с предварительными плоскостями ослабления при одноосном и объемном сжатии.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, одноосное сжатие, геоматериал, угол напластования, плоскости ослабления, предел прочности, модуль деформации, динамический модуль Юнга.

STRAIN-STRENGTH PROPERTIES OF LAMINATED-STRUCTURE GEOMATERIALS UNDER UNIAXIAL AND BULK COMPRESSION

Olga M. Usol'tseva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of The Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical, and Geodynamic Measurements, SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx prospect; Ph. D., Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Main Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

The researchers report the regularities for the bedding angle effect on strain-strength quasi-static and elastic dynamic characteristics of geomaterial specimens of two-type structures: continuous and with initially weakened planes under uniaxial and bulk compression.

Key words: laboratory test, uniaxial compression, geomaterial, bedding angle, weakened planes, ultimate strength, deformation modulus, Young modulus.

Для прогноза устойчивости породных массивов при ведении горных работ, в том числе на больших глубинах, оценки несущей способности грунтов и горных пород при проектировании и возведении зданий и сооружений, а также создания качественных моделей поведения горных пород под действием различного видов нагрузок, необходимо учитывать, что горная порода является сложноорганизованной неоднородной средой, во многих случаях проявляющей существенно анизотропные свойства. Обзор литературы за последнее время показывает, что большое внимание исследователей уделяется изучению влияния структуры и текстуры горных пород, в частности слоистых сред, на развитие в них деформационных процессов [1-4].

Основная задача исследования состояла в том, чтобы определить закономерности изменения деформационно-прочностных свойств образцов искусственных геоматериалов и горных пород со слоистой структурой в зависимости от угла напластования при трех видах нагружения – растяжении, одноосном сжатии, объемном сжатии. Данная работа является продолжением исследований 2015 г. Образцы из искусственный геоматериала были изготовлены по методике 2015 г., они состояли из двух чередующихся слоев различного состава: 1-й слой: песок – 30 г, цемент – 10 г, клей Neolit – 4 г, вода – 2,5 г; 2-й слой: песок – 30 г, цемент – 5 г, клей Neolit – 3,5 г, вода – 2,5 г. Размеры цилиндрических образцов – длина 60 мм, диаметр 30 мм. Угол напластования (угол между осью цилиндра и нормалью к плоскости слоев (изотропии)) составлял $\Psi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$. В 2016 г. слоистый материал изготавливался прием непрерывно в один, в отличие от предыдущего исследования 2015 г., когда каждый слой добавлялся после выдержки в одни сутки, т.е. создавались предварительные плоскости ослабления. На рис.1 приведены фотографии некоторых образцов до испытания.

Была проведена серия экспериментов на одноосное сжатие, объемное сжатие при двух различных значениях бокового давления 3 МПа и 6 МПа (не менее 3-х образцов для каждого вида испытаний). Скорость деформирования составляла 1 мм/мин. Для каждого типа материала построены зависимости предела прочности (σ^B), модуля деформации ($E_{ст}$) и коэффициента поперечной деформации (ν) в зависимости от угла напластования Ψ .

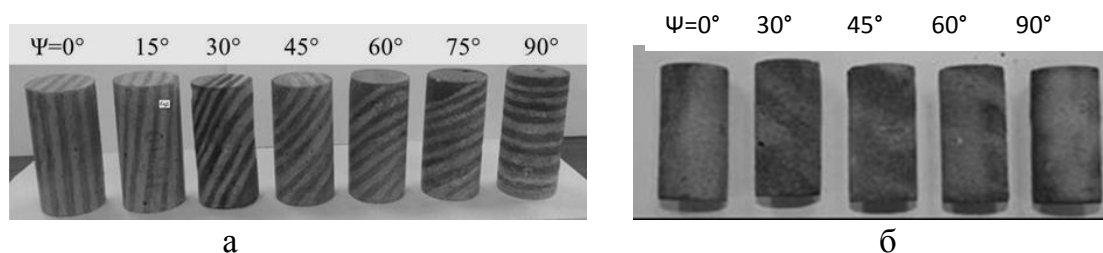


Рис. 1. Фотографии образцов искусственного геоматериала до испытаний ($\Psi=0^\circ \div 90^\circ$); с предварительными плоскостями ослабления (а); сплошные (б)

Испытания образцов проводились на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802, программа нагружения задавалась по перемещению траверсы прессы, проводилось непрерывное измерение и запись результатов эксперимента в компьютерный файл: осевой нагрузки, продольных и поперечных деформаций. Методики испытаний и измерений составлялись на основе [5-10]. На рис. 2 приводятся зависимости пределов прочности и модулей деформации образцов искусственного геоматериала от угла напластования при одноосном сжатии; объемном сжатии при боковом давлении 3 МПа; объемном сжатии при боковом давлении для образцов из сплошного слоистого материала и с предварительными плоскостями ослабления.

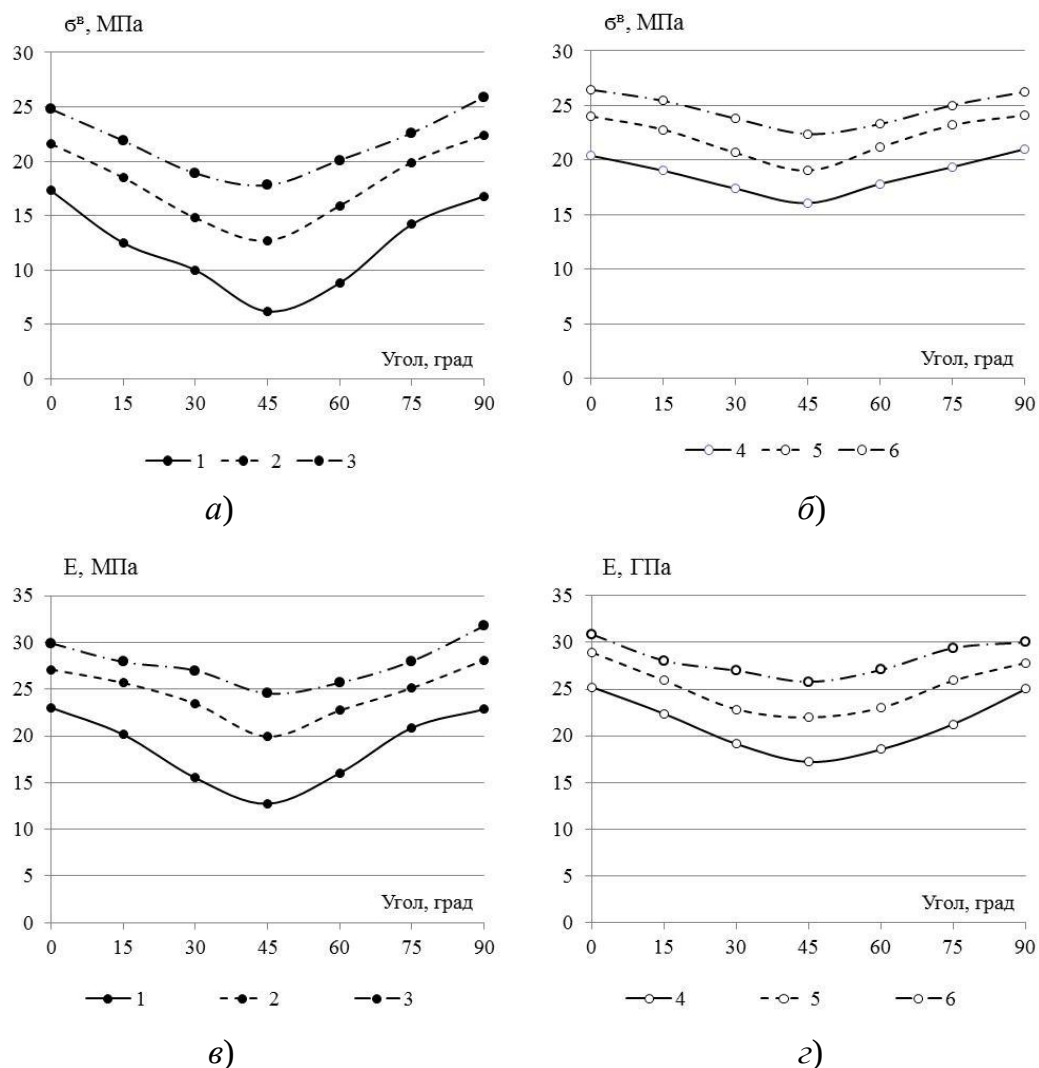


Рис. 2. Зависимости пределов прочности (а, б) и модулей деформации (в, г) образцов искусственного геоматериала от угла напластования при одноосном сжатии (1, 4); объемном сжатии при боковом давлении 3 МПа (2, 5); объемном сжатии при боковом давлении 6 МПа (3, 6); кривые 1-3 – образцы с предварительными плоскостями ослабления, 4-6 – образцы из сплошного геоматериала

Анализ экспериментальных данных показал, что степень анизотропии существенно влияет на деформационно-прочностные свойства образцов искусственного геоматериала со слоистой структурой.

- При одноосном и объемном сжатии для двух типов геоматериала, как сплошного (тип 2), так и с предварительными плоскостями ослабления (тип 1): при значениях угла напластования $\Psi=0^\circ, 90^\circ$ пределы прочности и модули деформации принимают максимальные значения и отличаются не более 1-3%; минимальное значение пределы прочности и модули деформации принимают при $\Psi=45^\circ$. Для геоматериала типа 1 зависимости пределов прочности и модулей деформации от угла напластования более слабые.

- Отношение σ^B (при $\Psi=90^\circ$)/ σ^B (при $\Psi=45^\circ$) при одноосном сжатии и объемном сжатии при боковом давлении 3 и 6 МПа составляет 1,3÷1,18 для материала типа 2 и 2,79; 1,76; 1,45 – для материала типа 2. Отношение E (при $\Psi=90^\circ$)/ E (при $\Psi=45^\circ$) при одноосном сжатии и объемном сжатии при боковом давлении 3 и 6 МПа составляет 1,5÷1,2 для материала типа 2 и 1,81÷1,29 – для материала типа 2. Отношения значений пределов прочности при одноосном, объемном сжатии (3 и 6 МПа) к значению предела прочности наиболее прочного слоя для геоматериала типа 1 составляет 1,05; 1,02 при $\Psi=90^\circ$ и 1,33; 1,28; 1,22 при $\Psi=45^\circ$; аналогичные отношения модулей деформации составляют 1,02 при $\Psi=90^\circ$ и 1,5; 1,36; 1,21 при $\Psi=45^\circ$.

- Отношения значений пределов прочности при одноосном, объемном сжатии (3 и 6 МПа) к значению предела прочности наиболее прочного слоя для геоматериала типа 2 составляет 1,24; 1,13, 1,05 при $\Psi=90^\circ$ и 3,45; 1,91; 1,53 при $\Psi=45^\circ$; аналогичные отношения модулей деформации составляют 1,12; 1,1; 1,05 при $\Psi=90^\circ$ и 2,03; 1,5; 1,28 при $\Psi=45^\circ$.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование подтверждает, что в слоистой анизотропной геосреде деформационно-прочностные характеристики существенно зависят от угла напластования. Установлены зависимости деформационно-прочностных характеристик слоистых геоматериалов от параметров структуры. На основе теоретической модели Тиена-Саламона дана оценка упругих параметров слоистых геосред (модуль упругости, коэффициент Пуассона). На основе критерия разрушения Хоека-Брауна получен прочностной параметр n_{av} , который не зависит от уровня бокового давления. Полученные в результате проведенного исследования данные о закономерностях изменения деформационно-прочностных характеристик геоматериалов и горных пород в при различных видах нагружения, а также их корреляция со структурой, могут быть использованы при оценке деформационно-прочностных свойств керна, расчете НДС.

Исследование выполнено в рамках НИР, проект «Разработка методов и измерительных средств для создания комплексных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности горнодобывающих предприятий Сибири. Геомеханика и физика формирования и развития очаговых зон катастрофических событий, разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах» на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строкова Л.А., Шагоруна Е.Г.. Взаимосвязь структурно-текстурных особенностей горных пород и их прочности // Технология и техника геологоразведочных работ. Томский политехнический университет. 2010.

2. Трчкова И., Живор Р.. Сравнение физических и механических свойств образцов пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов с поверхности // Вестник МГТУ, том 10, №2, 2007 г.
3. Бабиюк Г.В., Курман С.А.. Влияние слоистости пород на их прочностные свойства // Электронный архив Донецкого национального технического университета (г.Донецк). 2006.
4. Ghazvinian A., Geranmayeh R., Vaneghi M., Hadei R., Azinfar M.J.. Shear behavior of inherently anisotropic rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 61, 2013.
5. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
6. ГОСТ 21153.2–84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
7. ГОСТ 21153.3–85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.
8. ГОСТ 21153.8–88 Породы горные. Методы определения предела прочности при объёмном сжатии.
9. ГОСТ 21153.7–75 Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
10. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979.
11. Tien Y.M., Tsao P.F.. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 37, pp. 1001-1012, 2000.
12. Tien Y.M., Kuo M.C., Juang C.H.. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 43, pp. 1163-1181, 2006.

© О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, Б. Б. Сиволап, 2017

УЧЕТ НАНОПОР В УГЛЕ КАК ОСНОВА СНИЖЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ В ШАХТАХ

Александр Яковлевич Хавкин

Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, 119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 65, доктор технических наук, профессор кафедры, тел. (499)507-84-12, e-mail: aykhavkin@yandex.ru

Татьяна Анатольевна Киряева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

Показано, что задачу обеспечения безопасной шахтной добычи угля путем эффективного извлечения углеметана и/или его консервации невозможно решить без учета наноразмерных свойств угля как резервуара природного газа.

Ключевые слова: уголь, метан, безопасность, поры, наноразмер, штрек.

ACCOUNTING COAL NANOPORE AS A BASIS FOR REDUCING THE NUMBER OF ACCIDENTS IN MINES

Aleksandr Ya. Khavkin

Gubkin Russian State University (National Research University) of oil and gas, 119991, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 65, D. Sc., Professor, tel. (499)507-84-12, e-mail: aykhavkin@yandex.ru

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

It is shown that the task of ensuring the safe production of coal mine through the effective extraction of coalmethane and/or its preservation cannot be solved without taking into account nanoscale properties of coal as a reservoir of natural gas.

Key words: coal, methane, safety, pores, nanoscale, drift.

Одной из современных проблем горнодобывающей промышленности является обеспечение безопасной добычи угля [1-3].

Как показывает статистика [2], каждый год при взрывах в угольных шахтах гибнет более 100 человек, а стоимость восстановления шахт превышает десятки миллиардов рублей [3].

Причинами аварий обычно становились изношенное оборудование, нарушение техники безопасности, халатность тех, кто по долгу службы обязан отвечать за безопасность и жизни самих шахтеров.

Всего с 1992г. на российских угольных шахтах произошло более 10 аварий, жертвами в которых становились 25 и более человек.

Авария на угольной шахте «Северная» АО «Воркутауголь» стала шестой по числу жертв в современной истории России [3]. 25 февраля 2016г. на шахте «Северная» («Воркутауголь») на глубине 780 м произошел внезапный выброс метана и два взрыва, повлекшие обрушение породы. В этот момент под землей находились 111 человек.

В первые часы удалось вывести на поверхность 81 горняка, из них шестеро были госпитализированы. Погибли четыре шахтера, еще 26 пропали без вести. Во время спасательной операции ночью 28 февраля произошел третий взрыв, в результате погибли пять горноспасателей и работник шахты, еще пять человек получили ранения.

8-9 мая 2010г. на шахте «Распадская» произошли два взрыва метана. В момент первого взрыва под землей находились 359 шахтеров, 276 были выведены на поверхность. Для проведения спасательных работ в шахту было направлено 9 отделений горноспасателей – всего 54 человека. В это время произошел второй, более мощный взрыв, разрушивший наземные сооружения шахты. Всего результате катастрофы погиб 91 человек, порядка 100 получили ранения. Тела 11 погибших так и не были найдены. Восстановить добычу угля на шахте в полном объеме удалось только в конце 2014г.

Взрыв на шахте «Ульяновская» (входит в «Южкузбассуголь», контролируемый Evraz Group) в Кемеровской области произошел 19 марта 2007г.. Эта авария стала крупнейшей в российской угледобыче за почти 80 лет. На момент аварии в шахте находились 203 горняка. От травм, термических ожогов и отравлений погибли 110 человек, еще 7 были ранены, 93 человека удалось вывести на поверхность. Помимо самих горняков, в шахте находилось все ее руководство (20 человек, кроме директора, который был в отпуске) и аудитор из Великобритании. Материальный ущерб составил более 616 миллионов рублей.

Согласно первоначальным выводам следствия, в шахте были завышены показатели предельно допустимого уровня содержания метана, а вентиляция не работала должным образом. Взрыв произошел от искрящего кабеля.

Авария на шахте «Юбилейная» (принадлежит предприятию «Южкузбассуголь», входящему в Evraz Group) произошла 27 мая 2007г. На момент взрыва под землей находились 217 человек, из которых 179 горняков вывели на поверхность. Из них 7 человек госпитализировали с травмами различной степени тяжести. В результате аварии погибли 39 человек.

В качестве причины аварии называлось повреждение комбайнового кабеля: оно вызвало искру, спровоцировавшую взрыв. Авария была классифицирована как взрыв метановоздушной смеси и угольной пыли, аналогичный произошедшему на шахте «Ульяновская». Как сообщал MiningWiki, глава Ростехнадзора заявил, что имело место несанкционированное вмешательство в систему газоконтроля, в результате чего датчики не отреагировали на выброс метана.

Шахтным способом в России добывается около 100 млн. тонн угля в год. Пыль и газообразные продукты в атмосфере горных выработок и на поверхности техногенного массива являются во многих случаях источниками профессиональных вредностей, а также опасности возгораний и взрывов. Заболевания органов дыхания рабочих являются самыми распространенными (более 30%) при добычи угля, а взрывы газа и пыли в подземных выработках сопровождается наибольшим числом жертв, а пожары – максимальным экономическим ущербом. Разработка метаноносных пластов продолжает оставаться одним из основных факторов риска взрывов метано-пылевоздушных смесей с большими человеческими и экономическими потерями [4].

Трагические события на угольных шахтах позволяют сделать вывод о явных недостатках существующих способов борьбы с пылевыделением и пылепереносом, а также локализации пожаров. При постоянном улучшении применяемых способов вентиляции шахт, современных приборов газоанализа, всё чаще основной причиной пожаров и взрывов является человеческий фактор.

В связи с этим, необходима разработка надежных систем защиты рабочей зоны угольных шахт от взрывов пыли и газа, исключаящих негативное влияние человека.

Проблема извлечения метана из угольных пластов имеет два аспекта: извлечение метана как углеводородного продукта до начала шахтной выработки и снижение последующего выделения метана в горные выработки шахт при шахтной добыче угля.

Наиболее эффективным мероприятием по снижению выделения метана в горные выработки шахт является дегазация угольных пластов и коллекторов природных скоплений свободного газа через скважины, пробуренные с земной поверхности или из подземных выработок.

Но оказалось, что предварительное скважинное извлечение метана не столь эффективно технологически и не рационально экономически.

Разбавление газа, поступающего из окружающего массива, до безопасных концентраций вентиляционной струей свежего воздуха в шахтных выработках ещё не является гарантией безопасности ведения работ, поскольку эпизодические «всплески» концентрации метана могут превышать допустимые пределы и вызывать его воспламенение, переходящие во взрывы газа и пыли [4].

В настоящее время в России метан из угольных пластов извлекается попутно на полях действующих шахт системами шахтной дегазации, включающими скважины, пробуренные с поверхности. Этими системами в последние годы в Печорском и Кузнецком бассейнах извлекалось около 0,5 млрд. куб. м метана в год. В 2003г. «Газпром» приступил к реализации проекта по оценке возможности промышленной добычи метана из угольных пластов в Кузбассе. В Ерунаковском районе Кемеровской области на Талдинской площади Кузбасса пробурены 4 экспериментальные скважины, где в 2004г. получены первые притоки газа. Кроме того, были подготовлены методики подсчета запасов метана угольных пластов, разработаны и апробированы технологии добычи метана, создана нормативная база, обеспечивающая освоение ресурсов метана угольных пластов и экологическую безопасность метаноугольных промыслов [5].

Анализ способов воздействия на уголь как с целью отобрать природный газ, так и для обеспечения более безопасного ведения штрековой добычи угля, привел автора к выводу, что при этом не учитывается наноразмерный уровень пор угля. В угле мало пор диаметром 10-100 нм, а много пор диаметром менее 10 нм [6]. Поэтому уголь является нанокolleктором природного газа, и борьба с выбросами природного газа и его добыча должны ориентироваться на работу с закрытыми наноразмерными порами.

По мнению автора, вследствие наличия нанопор в угле происходят следующие явления. При отборе метана из угольных пластов через скважины, в них притекает метан, находящийся в микропорах. А метан, находящийся в нанопорах удерживается молекулярными силами. Прекращение выхода метана в скважины еще не означает отбор всего метана из угольного пласта.

Вывод экологических и аварийно-спасательных служб об извлечении всего метана из угольного пласта в этих условиях не соответствует действительности, но они разрешают начать шахтную выработку угля.

При шахтной выработке угля, угольный пласт оказывается подвержен изменению вследствие напряженно-деформационных усилий от вышележащих пород. При этом происходит изменение внутренней структуры угольной породы вследствие образования новых микро- и нанотрещин. В результате, ранее не сообщавшиеся нанопоры, объединяются в один микроклатер, в котором метан уже может двигаться. При

создании условий для выхода этого метана в шахту, происходит выброс метана, который считается, почему-то, случайными.

На самом деле, наличие нанопор в угле почти со стопроцентной вероятностью означает возможные прорывы метана в шахту.

Поэтому задачу обеспечения безопасной шахтной добычи угля путем эффективного извлечения углеметана и/или его консервации невозможно решить без учета наноразмерных свойств угля как резервуара природного газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хавкин А.Я. Уголь как нанокolleктор природного газа // Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям. Материалы Конференции (Москва, 18-19 ноября 2008г.). – М.: Нефть и газ, 2008. – С. 236-237.
2. Шувалов Ю.В. Безопасность жизнедеятельности трудящихся в горнодобывающих регионах Севера // СПб.: МАНЭБ, 2006.
3. 10 крупнейших аварий на угольных шахтах России // [Electronic resource], Режим доступа: http://pikabu.ru/story/10_krupneyshikh_avariy_na_ugolnyikh_shakhtakh_rossii_4124534, <https://ria.ru/economy/20100624/249834815.html>.
4. Шувалов Ю.В., Смирнов Ю.Д. Твердеющие смеси для защиты от негативного воздействия техногенеза и окружающей среды // [Electronic resource], Режим доступа: Интернет, Популярное бетоноведение. – Дата публикации: 11.06.2008.
5. Перспективы освоения ресурсов метана угольных бассейнов России. Справочные материалы // М.: ОАО «Газпром». [Electronic resource], Режим доступа: Интернет – Справочные материалы.htm – 21.03.2008,.
6. Жекамухов М.К., Жекамухова И.М. К проблеме внезапных выбросов угля в шахтах // [Electronic resource], Режим доступа: Электронный журнал «Исследовано в России». – 2003 – № 4 – С. 526-538.

© А. Я. Хавкин, Т. А. Киряева, 2017

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА СИСТЕМУ «УГОЛЬ – МЕТАН»

Михаил Николаевич Цупов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий инженер НИЦ, тел. (383)217-05-22, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, зав. НИЦ, тел. (383)217-01-26, e-mail: sav@eml.ru

Рассмотрены способы дегазации угольного пласта. Разработан стенд для определения оптимальных параметров физических воздействий на угольный керн с целью его дегазации.

Ключевые слова: способы дегазации, стенд, фильтрация, физические воздействия.

TEST BENCH TO STUDY PHYSICAL FIELD EFFECTS ON COAL-METHANE SYSTEM

Mikhail N. Tsupov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Engineer, Research and Development Center, tel. (383)217-05-22, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Andrei V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Head of Research and Development Center, tel. (383)217-01-26, e-mail: sav@eml.ru

The paper discusses techniques for methane drainage from a coalbed. The authors have developed a test bench to determine optimal parameters of physical effects on a coal core specimen to remove methane from it.

Key words: methane drainage techniques, test bench, filtration, physical effects.

Мировая промышленность и энергетический комплекс потребляют все больше углеводородов, поэтому добывающие компании наращивают объемы добычи нефти, угля и газа. Месторождения нефти значительно истощены и требуют новых подходов в добыче. Разработка угольных месторождений связана с повышенной опасностью для работников шахт и карьеров. В процессе использования угля происходит выделение вредных веществ, которые опасны для окружающей среды и для жизнедеятельности человека. Развитые мировые страны переходят на более чистый вид топлива – природный газ, но разрабатываемые газовые месторождения не могут обеспечить полную потребность человечества в этом виде полезного ископаемого. Эта проблема заставила по-новому взглянуть на такой ресурс как углеметан. Еще 20 лет назад метан угольных пластов рассматривался как осложняющий фактор при добыче угля, а в настоящее время большинство стран добывают и используют этот попутный газ. В Кемеровской области на Талдинском месторождении добычей метана, начиная с 2003 года по настоящее время, занимается ООО «Газпром добыча Кузнецк», – дочерняя компания ОАО «Газпром». С начала эксплуатации месторождения ей было добыто более 20 млн м³ газа [1].

Добыча углеметана на месторождении, а также при дегазации шахты, осложнена сорбированием его вмещающей породой – углем. Несмотря на хрупкость и пористость угля, принято считать, что он отдает лишь от 10 до 30% содержащегося в нем углеметана [2,3], а остальное количество газа, по мнению групп исследователей, может находиться в связанном, растворенном или другом состоянии.

Предложены и испытаны множество способов увеличения дебита метана, большая часть из которых пришла из хорошо изученных и применяемых на нефтяных месторождениях. Наибольшее практическое применение при добыче углеметана нашел метод гидроразрыва пласта. Несмотря на все преимущества этого метода, проявленные на нефтяных промыслах, и хороший коэффициент полезного действия при добыче углеметана, данная технология предусматривает разрушение пласта в области воздействия, что может существенно затруднить дальнейшую отработку забойного участка или сделать добычу вовсе невозможной.

Решением вопросов улучшения проницаемости пластов и увеличением дебита газа занимаются во всем мире. Предлагается множество решений, экспериментально опробованных на практике: от применения волновых воздействий на продуктивный пласт, до крайне радикального – ядерного взрыва, апробированного в США в декабре 1967 года для улучшения коллекторских свойств сланца при добыче газа [4-9].

Рассмотрим некоторые методы воздействия на угольный массив, проверенные на практике:

- Волновые методы. Основаны на воздействии на массив вмещающих пород волнами различной длины, амплитуды и интенсивности излучения. К волновым можно отнести: акустический, ультразвуковой и сейсмический методы. Например, работы по сейсмическому воздействию проводились на шахте «Комсомольская» ОАО «Воркутауголь» через скважину № 4447 при гидрорасчленении пласта угля. Подтверждено увеличение проницаемости пласта и его снижение в течение 72 часов после окончания воздействия [10].

- Депрессионные методы. Основаны на создании перепада давлений в скважине (сетке соседних скважин). К ним можно отнести: гидроимпульсный, депрессионный и барогradientный методы. На участке ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» в скважине Д-5 для восстановления дебита метана проведено 10 циклов, при которых в скважину закачивался воздух под давлением до 7 МПа, а потом давление резко сбрасывалось. В результате зафиксирован рост метановыделения на 8% [11].

- Разрушение пласта. Основано на образовании дополнительных свободных поверхностей в продуктивном пласте. Разрушение производят гидравлическим разрывом, гидрорасчленением, кавитацией.

- Метод воздействия электрическим током. Основан на воздействии электромагнитным полем на породу и содержащийся в ней флюид. На ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько», Украина, проведены испытания по воздействию электрическим током, мощность источника составляла 30 кВт, а частота 0,2 Гц [11].

- Термический метод. Заключается в температурном воздействии на продуктивный пласт.

Все вышеперечисленные методы и эффекты от их применения к системе уголь-метан недостаточно изучены. После проверки в лабораторных или натурных условиях большинство из них, в силу ряда причин, не нашли широкого применения на практике. Режимы применения и методики также недостаточно проработаны. Комплексным исследованиям с целью дегазации в системе уголь-метан с применением всех выше-

описанных методов уделяется недостаточно внимания. Для более глубокого, комплексного исследования проблем дегазации углей создан специальный стенд, некоторые элементы конструкции которого представлены на рис. 1.

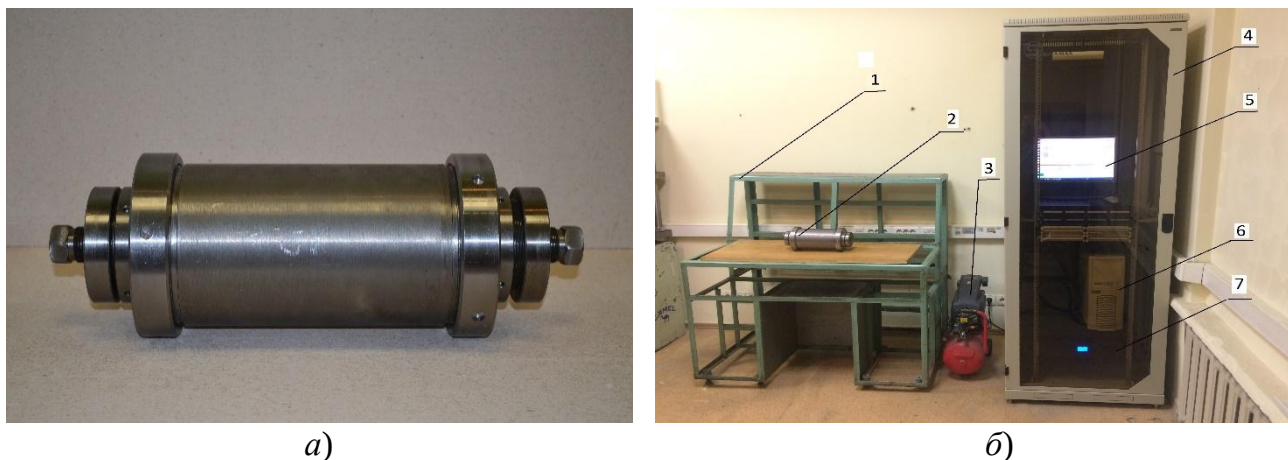


Рис. 1. Внешний вид камеры и стенда:

а) внешний вид камеры; б) стенд: 1-каркас для размещения аппаратуры и камеры, 2-камера, 3-компрессор, 4 шкаф электроники, 5 монитор визуального контроля систем, 6-ПК, 7-ИБП

Конструкция стенда включает в себя: камеру для испытаний высокого давления, гидравлическую, механическую, пневматическую, измерительную, электромеханическую системы.

Гидравлическая схема обеспечивает трехосное нагружение образца (рис. 2).

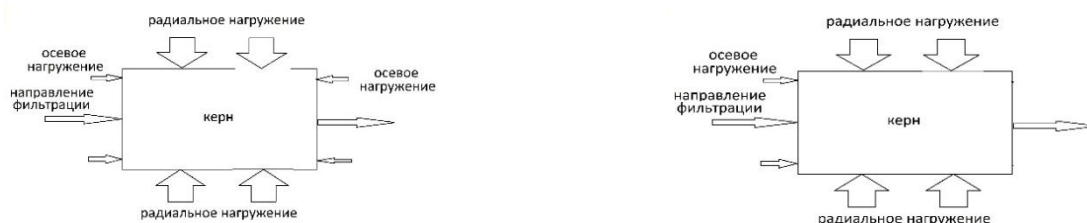


Рис. 2. Различные способы моделирования пластовых условий:

а) моделирование состояния нетронутого массива; б) моделирование забоя

Система осевого нагружения обеспечивает давление на торцах образца независимо друг от друга. В ее состав входят: поршни, упорные втулки, пресс, система регулируемых клапанов, нагнетательная станция, пневмогидро аккумулятор, манометры.

Пневматическая схема предназначена для обеспечения разницы давлений между нагнетательной и выходной гранями образца вдоль направления фильтрации в керне, а также для депрессионного и химического воздействия на образец. В ее состав входят: пневмогидро аккумулятор, вакуумная станция, регулирующие клапана, манометры, дозаторы.

Измерительная система предназначена для контроля и регистрации параметров физических полей, воздействующих на керн в ходе проведения экспериментов. Она включает в себя датчики: давления, химического состава газовых сред в фильтрационном потоке, сейсмодатчики, температуры на торцах и вдоль керна, а так же температуры воздуха в окружающей среде. Для регистрации сигналов используются: осциллограф HANDYSCOPE HS4 DIFF, АЦП ZET-220, персональный компьютер (ПК).

Электромеханическая схема предназначена для обеспечения возможности воздействия на образец различными физическими полями: электрическим, магнитным, сейсмическим, ультразвуковым, акустическим и другими. Она включает в себя: генератор частоты электрического поля, электроды, электромагниты, регулирующие клапана, систему переменного нагружения гидро- (пнеumo-) системы, источник гармонических колебаний, источники акустических волн, источник ультразвуковых волн, АЦП, ПК. На рис. 3 приведены направления распространения сейсмических и электромагнитных волн, размещение тепловых источников, электродов для электровоздействия на образец, а также форсунок для подачи химического реагента.

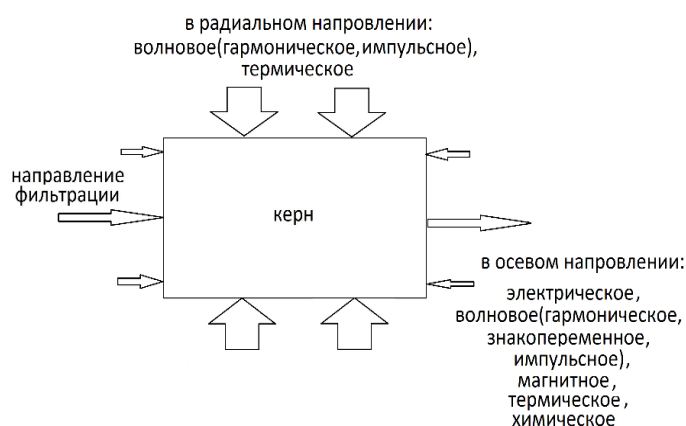


Рис. 3. Схема расположения различных источников на границах керна

Исследуемый керн помещается в резиновую оболочку, предварительно установленную в корпус лабораторной камеры, после чего монтируются торцевые поршневые зажимы с крышками. В пространство между керном и внешней оболочкой камеры под давлением подается рабочая жидкость для моделирования пластового давления. Создаваемое компрессором давление жидкости регулируется и поддерживается на одном уровне системой регулируемых клапанов. Система стенда предусматривает возможность пневмонагружения обжима образца. Одновременно в камере осуществляется торцевое нагружение образца одним из способов: резьбовыми втулками (при малых давлениях) или прессом (при больших давлениях). Давление жидкости, оказываемое на торцы образца, может быть различным и изменяться от нескольких Па (вакуумирование) до 45 МПа. Следует отметить, что средняя глубина залегания угля, например, в кузнецком бассейне 300 метров.

Стенд позволяет производить исследования воздействия на керн диаметром до 65мм и длиной до 130мм:

•Электрическим током. Для этого с торцов к образцу подводятся электроды, соединенные через гермовводы с генератором тока, позволяющим изменять как частоту, так и напряжение подаваемого на электроды.

•Гармоническими колебаниями (импульсными или знакопеременными). Для этого на торцевые зажимы установки устанавливают источник колебаний. Радиальное волновое воздействие обеспечивается клапанами и достигается за счет пульсации давления в пространстве между керном и внешней оболочкой камеры. Предусмотрена возможность установки источника гармонических колебаний с регулируемой частотой вращения непосредственно в исследуемый образец или на один из торцов, сохраняя возможность торцевого нагружения.

•Тепловым воздействием. Осуществляется подогревом рабочей жидкости радиального нагружения, поршней и фильтрационной смеси. Для контроля температурного режима на стенде, а также окружающей среды, установлены термодатчики. Их регулировка осуществляется автоматически через АЦП и ПК.

•Магнитным воздействием. Для этого на торцах керна устанавливаются электромагниты.

•Депрессионное воздействие. Осуществляется за счет вакуумирования или создания высокого давления на выходном торце керна. Для управления данным воздействием в фильтрационных каналах камеры установлены датчики давления, вакуумный насос и компрессор.

Исследование химического воздействия на систему метан-уголь, а также возможность дегазации метана из керна осуществляется через каналы, подводящие к торцам камеры. Эффективность воздействия оценивается по изменению состава газовой смеси на входе и выходе из керна при фильтрации инертным газом или жидкостью.

Заключение. Проведенный обзор литературных источников по дегазации угольных пластов показал, что вопрос по комплексному воздействию различных физических полей на систему метан-уголь изучен недостаточно полно и требуется проведение дополнительных исследований. Для более глубокого изучения метода дегазации угля в зависимости от горногеологических условий месторождения, в Институте горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН создается специализированный стенд, на котором можно моделировать как состояние нетронутого массива, так и забоя, приближая условия среды к пластовым: по давлению, температуре, влажности образца. Конструкцией стенда предусмотрена возможность воздействовать различными физическими полями, как по отдельности, так и в комплексе, на образцы угля различных марок с целью их дегазации без разрушения керна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайт Газпрома. Режим доступа: <http://kuznetsk-dobycha.gazprom.ru/about/today/>
2. Сторонский Н.М. Нетрадиционные ресурсы метана угленосных толщ / Н.М. Сторонский, В.Т. Хрюкин, Д.В. Митронов, Е.В. Швачко // Рос. хим. ж. 2008. Т. LII, № 6. – С. 63-72.
3. Алексеев А.Д. Метан угольных пластов. Формы нахождения и проблемы извлечения // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. –Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 87. – С. 10-15.
4. Рахматуллин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках // М.: Физматгиз, 1961. – 400 с.
5. Web-ресурс. Режим доступа: http://neftegaz.ru/tech_library/view/4421-Gidravlicheskiy-razryv-plasta-GRP

6. Пучков Л.А. Извлечение метана из угольных пластов / Л.А. Пучков, С.В. Сластунов, К.С. Коликов // – М.: МГГУ. 2002. – С. 383.
7. Шльонзак Н., Шльонзак Я. Дегазация угольных пластов и использование метана на польских каменноугольных шахтах // Компрессорное и энергетическое машиностроение/ №1 март 2011г. – С. 8-14.
8. Дуган Т., Арнольд Э. GAS! Страницы истории добычи угольного метана в бассейне Сан-Хуан // - М.: GBM Pftners 2008. – С. 186.
9. Клишин В.И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко // СО РАН, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. – 524 с.
10. Павленко М.В. Дегазация угольных пластов с использованием наземных сейсмоисточников / М.В. Павленко, С.В. Гурьев, Г.П. Лопухов, А.А. Юров // Известия вузов. Горный журнал. № 1. 2015. – С. 42-46.
11. Филимонов П.Е. Повышение эффективности поверхностных дегазационных скважин с применением пневмогидродинамического и электроразрывного воздействий / П.Е. Филимонов, Б.В. Бокий, В.В. Чередникова и [др.]. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2012. – С. 7-18.

© М. Н. Цупов, А. В. Савченко, 2017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ПЛАСТИЧНОСТИ ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ ГЛУБОКОГО ЗАЛЕГАНИЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, тел. (383)335-97-50; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ильгизар Маратович Абдулин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Рассматривается цилиндрическая выработка, в окрестности которой имеется пластическая зона. Контур выработки свободен от напряжений, массив горных пород вокруг выработки удовлетворяет условию пластичности Кулон-Мора. Показывается, как по данным измерений смещений на контуре выработки находятся смещения в самом массиве пород, по смещениям определяются деформации, по деформациям отыскивается упругопластическая граница. Задача решается в рамках плоской деформации.

Ключевые слова: пластичность, смещения, упругопластическая граница.

EVALUATION OF PLASTICITY ZONE AROUND A DEEP MINE WORKING FROM SHEAR MEASUREMENTS MADE AT ITS SURFACE

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Deputy Director for Science; Novosibirsk State University of Economics and Management, 630099, Russia, Novosibirsk, 52 Kamenskaya St., Professor, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Il'gizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Under consideration is a cylindrical mine working with a plastic zone in its periphery. The working contour is free of stresses, a rock mass around a mine working meets Coulomb-Mohr plasticity condition. It is demonstrated that the data on shear measurements in working periphery are used to evaluate displacements in a rock mass itself, the displacement values are employed to estimate deformations and deformations appear helpful to establish elasticity-plasticity interface. The problem is solved in terms of plane deformation.

Key words: plasticity, displacements, elasticity-plasticity interface.

Основной задачей геомеханики является определение напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработки. Для этого требуются определяющие соотношения горной породы, адекватно описывающие ее поведение при упругом, упругопластическом и запредельном деформированиях, требуются такого же порядка точности критерии перехода материала из одного состояния в дру-

гое. Традиционно массив горных пород рассматривается как первоначально изотропное тело с двумя константами упругости: E и ν . Между тем горные породы – первоначально анизотропны, разносопротивляются при растяжении и сжатии не только в упругости, но, что особенно ярко проявляется, при разрушении. Эти факты не могут не учитываться при оценке состояния массива пород вокруг выработок.

Другое обстоятельство, на которое следует обратить внимание, – на постановки задач геомеханики вокруг выработок. Обычно применяются первая, вторая, третья краевые задачи. Все эти постановки предполагают задание условий нагружения на «бесконечности», т.е. должны быть заданы напряжения в бесконечно удаленных точках. При этом очевидно то, что неправильная закладка условий о напряжениях на бесконечности приведет в расчетах к неправильным выводам относительно состояния массива пород вокруг выработок (как узнать то, что происходит на бесконечности?). Кроме этого на состояние массива пород вокруг выработки могут влиять соседние выработки, т.е. при решении задачи требуется еще знание всех границ других областей в окрестности выработки.

Между тем существует другая (неклассическая) постановка краевой задачи, которая не предполагает знания состояния массива пород на «бесконечности» и знаний других выработок и того, что происходит в них. В этой постановке требуется только локальная информация о состоянии массива пород вокруг выработки (в виде каких-то переопределенных граничных условий). Степень достоверности предсказаний состояния массива пород вокруг выработки определяется точностью измерений локальной информации. Это, так называемая постановка задачи Коши, когда на контуре исследуемой выработки измеряются все три смещения, строятся функции смещений на границе выработки. По этим функциям, используя уравнения равновесия, условия совместности деформаций, определяющие соотношения среды, находятся, во-первых все недостающие напряжения, деформации на контуре выработки, в самом массиве пород находятся напряжения, смещения вокруг выработки. По смещениям определяются деформации, по деформациям и по условию прочности находится граница, в которой начинается разрушение (если оно имеется). То есть это – такая постановка задачи геомеханики для выработки, когда без знания условий на «бесконечности», без знания геометрии всех других выработок находится все то, что определяет безопасность ведения горных пород в окрестности данной выработки.

Теперь по существу. Для построения определяющих соотношений горной породы вокруг выработки будем идти от простейшей модели для первоначально изотропной среды к более сложной, учитывающей первоначальную анизотропию.

Пусть T_σ , T_ε – тензоры напряжений и деформаций; 1, 2, 3 – главные оси этих тензоров, предполагается, что они совпадают. Далее рассматривается тензорный базис

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Базис (1) ортогональный, ортонормированный. В базисе (1) координаты T_σ , T_ε равны

$$S_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}}, \quad S_2 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3 - 2\sigma_1}{\sqrt{6}}, \quad S_3 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2}},$$

$$\Omega_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\sqrt{3}}, \quad \Omega_2 = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_1}{\sqrt{6}}, \quad \Omega_3 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sqrt{2}}.$$
(2)

Рассмотрим экспериментальные данные Ставрогина А.Н. [1], в которых цилиндрические образцы из различных горных пород подвергались действию осевой сжимающей нагрузки и боковому давлению. Пусть цифрой «1» помечено направление осевого сжатия образца, цифрами «2» и «3» – радиальное и тангенциальное направления. При этом $\sigma_2 = \sigma_3$ (следует из выполнения уравнений равновесия), $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ($\varepsilon_r = \varepsilon_\varphi$). Заметим, что в (2) ненулевые координаты – $S_1, S_2, \Omega_1, \Omega_2$.

На рис. 1 представлены диаграммы деформирования $S_1 = S_1(\Omega_1), S_2 = S_2(\Omega_2)$ для гранита. Видно, что они не являются «единицами», т.е. зависят от уровня бокового давления. Чтобы исправить ситуацию, повернем базис (1) вокруг орта T_3 на некоторый угол φ . Формулы преобразований координат представлены ниже:

$$\begin{cases} \tilde{S}_1 = S_1 \cos \varphi - S_2 \sin \varphi, & \tilde{S}_2 = S_1 \sin \varphi + S_2 \cos \varphi, \\ \tilde{\Omega}_1 = \Omega_1 \cos \varphi - \Omega_2 \sin \varphi, & \tilde{\Omega}_2 = \Omega_1 \sin \varphi + \Omega_2 \cos \varphi. \end{cases}$$
(3)

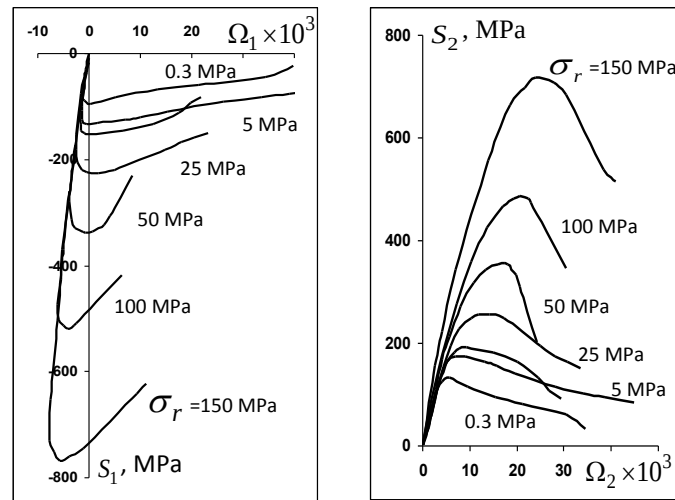


Рис. 1. Диаграммы деформирования гранита $S_1 = S_1(\Omega_1), S_2 = S_2(\Omega_2)$ при разных уровнях бокового давления

Угол φ изменяем от 0 до некоторого значения φ_* , при котором кривые $\tilde{S}_1 = \tilde{S}_1(\tilde{\Omega}_1), \tilde{S}_2 = \tilde{S}_2(\tilde{\Omega}_2)$ становятся «единицами», т.е. не зависящими от уровня бокового давления образцов. Базис $\tilde{T}_1 = T_1 \cos \varphi_* - T_2 \sin \varphi_*, \tilde{T}_2 = T_1 \sin \varphi_* + T_2 \cos \varphi_*$ при этом является собственным. Зависимость $\tilde{S}_1 = \tilde{S}_1(\tilde{\Omega}_1)$ близка к прямолинейной,

т.е. в упругости, в пластичности, при разрушении она имеет один и тот же характер – прямолинейный (рис. 2).

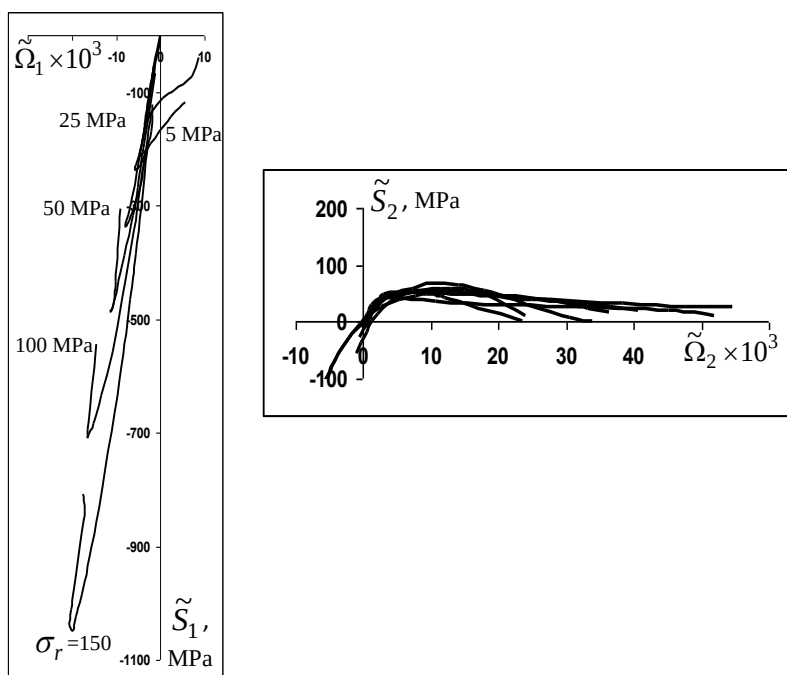


Рис. 2. Диаграммы деформирования гранита $\tilde{S}_1 = \tilde{S}_1(\tilde{\Omega}_1)$, $\tilde{S}_2 = \tilde{S}_2(\tilde{\Omega}_2)$ при разных уровнях бокового давления

Это означает, что $\Omega_1 \cos \varphi_* - \Omega_2 \sin \varphi_* = (S_1 \cos \varphi_* - S_2 \sin \varphi_*) / K$, где K – константа материала. Подставляя значения координат из (2), получаем

$$\frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_* - \frac{2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\sqrt{6}} \sin \varphi_* = \left[\frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_* - \frac{2(\sigma_2 - \sigma_1)}{\sqrt{6}} \sin \varphi_* \right] / K. \quad (4)$$

Условием пластичности среды будет $\tilde{S}_2 = \tau_s$, достигаемое на другой зависимости $\tilde{S}_2 = \tilde{S}_2(\tilde{\Omega}_2)$ (рис. 2):

$$\left| \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_* + \frac{2(\sigma_2 - \sigma_1)}{\sqrt{6}} \cos \varphi_* \right| = \tau_s. \quad (5)$$

Далее соотношения (4), (5) применяются к решению задачи о выработке в случае идеально-пластического деформирования вдоль орта $\tilde{T}_2$ [2].

Пусть дана цилиндрическая выработка. Оси цилиндрической системы координат обозначаем как r, z . На контуре выработки касательное напряжение $\tau_{rz} = 0$. При решении задачи считаем, что оно равно нулю не только на границе, но и во всех точках пластической зоны. Кроме этого, следуя [3], будем предполагать, что в пластической зоне два главных напряжения σ_z и σ_φ равны между собой ($\sigma_z = \sigma_\varphi$).

Для определения напряжений в пластической области имеем уравнения равновесия, условие пластичности (5), переписанное в виде

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{\sqrt{3}\tau_s + \sigma_r(\sin \varphi_* - \sqrt{2} \cos \varphi_*)}{2 \sin \varphi_* + \sqrt{2} \cos \varphi_*}. \quad (6)$$

Интегрируя уравнение равновесия при условии (6) получаем выражение для напряжения σ_r

$$\sigma_r = Cr^{\alpha} - \frac{\sqrt{3}\tau_s}{3 \sin \varphi_*}, \text{ где } C - \text{постоянная, } \alpha = -3 \sin \varphi_* / (2 \sin \varphi_* + \sqrt{2} \cos \varphi_*).$$

Напряженное состояние вокруг выработки в осесимметричной постановке таким образом определяется.

Для определения смещений в пластической области имеем уравнения другого сорта: условие упругого изменения деформаций вдоль орта $\tilde{T}_1$ и условие $\varepsilon_{rz} = 0$, вытекающее из предположения соосности тензоров T_{σ} , T_{ε} в пластичности при простых нагружениях. В перемещениях в случае $K = \infty$ получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \cos \varphi_* - \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{u}{r} + \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) \sin \varphi_* = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Эта система – гиперболического типа, она служит для определения u , ω в пластической области. То, что она гиперболического типа, означает, что на границе выработки $r = a$ необходимо задавать одновременно два смещения:

$$u|_{r=a} = f(z), \quad \omega|_{r=a} = \varphi(z).$$

Смещения $u = u(r, z)$, $\omega = \omega(r, z)$ таким образом восстанавливаются в пластической зоне. По смещениям находят деформации, по деформациям определяется упругопластическая граница.

Выводы.

Построена математическая модель упругопластического деформирования горных пород с двумя паспортными характеристиками.

Решена задача об определении пластической зоны вокруг выработки в осесимметричной постановке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 272 с.
2. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука. – 1969. – 420 с.
3. Ишлинский А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля // Прикл. математика и механика. – 1944. – Т. 8, вып. 3. – С. 201–224.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, 2017

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОСРЕДЫ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Анвар Исмагилови Чанышев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, тел. (383)335-97-50; Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ольга Евгеньевна Белоусова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: o.e.belousova@mail.ru

Ольга Анваровна Лукьяшко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

Для деформируемых сред (первоначально изотропных и первоначально анизотропных) вводится блочная модель, в которой основными элементами деформации являются простые удлинения и простые сдвиги. Для первоначально изотропных сред модель со структурой возникает в момент приложения нагрузок, далее она существует и изменяется в соответствии с изменяющимися главными осями тензора напряжений. На основе этой модели строятся определяющие соотношения поведения геосреды в упругости, в пластичности, при разрушении. Параметры определяющих соотношений восстанавливаются посредством обработки данных известных экспериментов. Показывается, что в окрестности выработок при нагружении происходят и простые сдвиги, и простые удлинения. Однако в отдаленных точках осуществляются только простые удлинения. В рамках указанных представлений дается интерпретация образования эффекта зональной дезинтеграции массива пород вокруг выработок.

Ключевые слова: блочная модель, определяющие соотношения, упругость, пластичность, разрушение, простое удлинение, простой сдвиг.

PHENOMENOLOGICAL GEOMEDIUM MODEL AND ITS APPLICATIONS

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (383)335-97-50, e-mail: belousova_o@ngs.ru

Olga A. Luk'yashko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Engineer, tel. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

The block model is introduced for deformed media being initially isotropic and initially anisotropic. The basic strain elements of the block model are simple extensions (stretchings) and pure shears. For initially isotropic media the structured model arises at the load-application moment. Hereupon it exists and alters according to variations in main axes of stress tensor. This model serves the basis for construction of constitutive relationships of geomedium behavior in elasticity, plasticity, and failure conditions. Parameters of constitutive relationships are recovered by processing of the earlier experimental data. It is justified that loads in periphery of mine workings result in simple shears and simple extensions. However exclusively simple extensions tend to develop in remote spots. The effect of zonal disintegration of a rock mass around mine workings is interpreted within the frame of the above concept.

Key words: block model, constitutive relationships, elasticity, plasticity, simple extension, simple shear.

Традиционно в геомеханике горные пород рассматриваются как материалы, которые в упругости ведут себя как металлы с двумя константами упругости - E и ν , в пластичности считается, что для них, в отличие от металлов, не выполняется ассоциированный закон течения, когда вектор приращений пластических деформаций не ортогонален к поверхности нагружения (направлен не по градиенту к указанной поверхности). Вместе с тем в механике деформируемого твердого тела все чаще [1] делаются выводы, что практически все материалы, включая металлы, не подчиняются при упругом деформировании обычному закону Гука, то есть двумя константами их поведение в упругости не описать. Виной являются разные значения модулей Юнга и коэффициента Пуассона при растяжении и сжатии, что подталкивает исследователей к созданию нового закона Гука, который эти различия мог бы учесть. На этом пути появились и продолжают образовываться новые определяющие соотношения упругости, так называемой разномодульной теории упругости, некоторые из вариантов которой представлены в [2].

Понятно, что этот вопрос находится в неразрывной связи с построением теории пластичности горных пород потому, что сумма пластических и упругих деформаций составляет общую или полную деформацию, которую регистрируют в экспериментах. Если неправильно вычисляется упругая деформация, то такой же результат имеем и для пластических деформаций и, в конечном счете, и для теории пластического деформирования горных пород. Это факт означает еще и то, что возможно для «правильных» теорий пластических деформаций выполняется ассоциированный закон течения (если были правильно вычислены упругие деформации), который во многих работах отрицается.

Необходимо еще добавить, что от того, какой теорией (правильной или неправильной) пользоваться, зависит безопасная работа шахты и рудников, эффективная добыча полезных ископаемых.

Предлагается модель первоначально изотропной среды горной породы при упругом, упругопластическом и запредельном деформировании как обобщение модели поведения металлических материалов при плоской деформации С.А. Христиановича и Е.И. Шемякина, соответствующей состоянию неполной пластичности [3]. Представим, что имеется тензор напряжений T_σ , у которого главные оси обозначены как 1,2,3 и нумерация осей выбрана так, что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. В направлении оси «2»

предполагается, что связь упругая и то, что происходит вдоль этой оси (напряжения, деформация и их изменения), никак не влияет на то, что происходит в плоскости 1, 3.

На рис. 1 изображен элемент среды в плоскости, проходящей через оси 1,3. К этому элементу, «вырезанному» площадками действия максимальных касательных напряжений, приложены нормальные напряжения $\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, касательные $\tau_n = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. На рис. 1б показано действие и результат действия максимальных касательных напряжений, то есть происходят подвижки одних частиц элемента среды относительно других. При этом, как видно из рис. 1б объем при сдвигах не увеличивается, вдоль направления действия усилий σ_n происходит упругое изменение деформации ε_n .

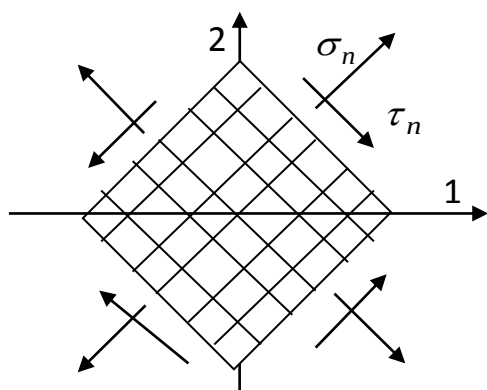


Рис. 1а. Элемент металлического материала в плоскости 1,3

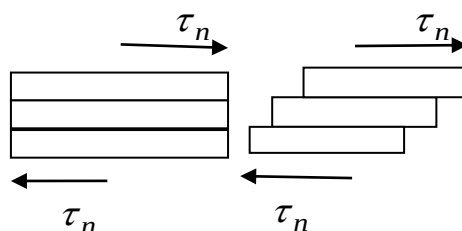


Рис. 1б. Сдвиги вдоль площадок действия максимального касательного напряжения

Расширим картину деформирования на рис. 1б введением «зубчатой» структуры, которая может привести к эффекту дилатансии. Эта ситуация представлена на рис. 2а. Здесь структура элемента среды наделяется возможными плоскостями скольжений, наклоненными к оси абсцисс под разными углами α , β . Понятно то, что поскольку речь идет о первоначально изотропной среде, где сдвиг в ту или другую сторону должен быть идентичным, то отсюда следует, что $\alpha = \beta$. Далее из рис. 2б видно, что при сдвиге образуется эффект дилатансии (положительный). Обратимся снова к рис. 2а, рис. 1а. Видно, что здесь существует конус с раствором угла при вершине 2α , при попадании силой внутрь которого никаких подвижек одних частей элемента среды относительно других быть не должно. Сдвиги появятся, если проекция силы $\vec{p}_n = \vec{\tau}_n + \vec{\sigma}_n$ на направление $\vec{l}$ будет положительной (рис. 2а). Отметим, что векторы $\vec{p}_n = \vec{\tau}_n + \vec{\sigma}_n$ и $\vec{q}_n = \vec{\gamma}_n + \vec{\varepsilon}_n$ ($\vec{q}_n$ - вектор деформации) – это феноменологические векторы по сути, рассматриваются на равно наклонных к осям 1,3 площадках (рис. 1а).

Для описания движения (на рис. 2б) проектируем их на направление $\vec{l}$ (направление сдвига) и направление $\vec{m}$ (перпендикулярно плоскости скольжения). Когда вектор $\vec{p}_n$ будет направлен внутрь конуса, образованного нормальными к плоскости скольжения на рис. 2а, то в этом случае предполагается, что векторы $\vec{p}_n$ и $\vec{q}_n$ пропорциональны – в направлении этих векторов происходит простое удлинение по схеме рис.3а с модулем жесткости $2k$:

$$\vec{q}_n = \vec{p}_n / 2k. \quad (1)$$

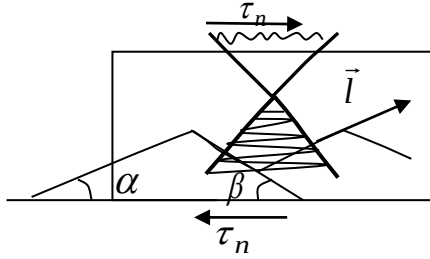


Рис. 2а. Усложненная структура элемента среды

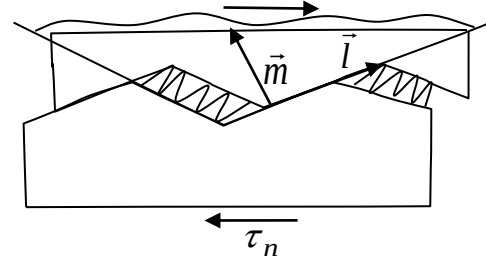


Рис. 2б. Положительный эффект дилатансии

Далее, если вектор $\vec{p}_n$ имеет на направление $\vec{l}$ (рис. 2) положительную проекцию, то $\vec{p}_n$ представляется суммой двух векторов:

$$\vec{p}_n = \vec{p}_l + \vec{p}_m. \quad (2)$$

Аналогично раскладывается соответствующий вектор $\vec{q}_n$:

$$\vec{q}_n = \vec{q}_l + \vec{q}_m. \quad (3)$$

Для направления $\vec{l}$ предполагается, что

$$\vec{q}_l = \vec{p}_l / 2\mu \quad (4)$$

в случае упругости или

$$\vec{q}_l = \vec{p}_l / 2\mu_c, \quad (5)$$

в случае пластичности, где $2\mu_c$ - секущий модуль на диаграмме деформирования $|\vec{p}_l| = |\vec{p}_l|(|\vec{q}_l|)$. Для направления $\vec{m}$ имеем зависимость, аналогичную (1):

$$\vec{q}_m = \vec{p}_m / 2k. \quad (6)$$

Если проекция $\vec{p}_n$ на направление $\vec{m}$ на рис. 2б окажется положительной (вектор $\vec{p}_n$ на рис. 2а будет направлен во внутрь конуса, то этом случае возможны чередования скольжений в направлении $\vec{l}$ (как указано на рис. 2б) и в другом противоположном направлении, определяемом углом β ($\beta = \alpha$) на рис. 2а. Сумма этих скольжений определяется суммарным вектором деформаций $\vec{q}_n$, который будет связан с полным вектором напряжений $\vec{p}_n$ зависимостью

$$\vec{q}_n = \vec{p}_n / 2\mu \quad (7)$$

(в случае упругости).

Результатом этих гипотез являются представленная на рис. 4 картина деформирования, на которой изображены три области деформирования – область I, в которой происходит один вид деформирования – простое удлинение в соответствии с (1); об-

ласть II, в которой происходят сдвиги в направлении $\vec{l}$ и простые удлинения в направлении $\vec{m}$ (формулы (2)-(6)); область III, в которой имеют место только простые сдвиги по формуле (7).

Эти соотношения (1)-(7) могут быть применены к задаче об определении напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработки. Решение показывает, что в этом случае вокруг выработки реализуются два режима деформирования на рис. 4. В ближней зоне к контуру выработки происходят простые сдвиги и простые удлинения по схеме рис. 3, рис. 2, в дальней зоне – только простые удлинения (что соответствует области I рис. 4). С ростом нагрузки на бесконечности деформации сдвига по схеме рис. 2 вблизи контура выработки возрастают, переходят в пластическую зону. Далее наступает ситуация, когда «трещины» на рис. 2б раскроются максимально, и в условиях сжимающей нагрузки σ_n части тела на рис. 2 по-прежнему остаются в связанном состоянии, происходит переход из положения раскрытия «трещин» в состояние их закрытия. Таким образом в окрестности выработки реализуются области с раскрытыми трещинами и закрытыми. Это явление в [4] называется явлением зональной дезинтеграции массива горных пород. Отметим, что кривые $\sigma_l = \sigma_l(\varepsilon_l)$, $\sigma_m = \sigma_m(\varepsilon_m)$ и угол α – это то, что находится на основе экспериментальных данных, например, [5].

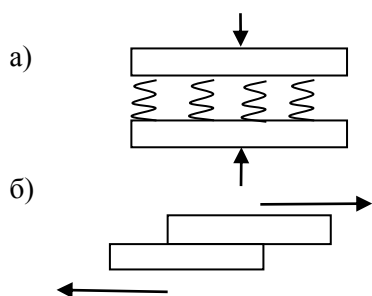


Рис. 3. Простое удлинение и простой сдвиг

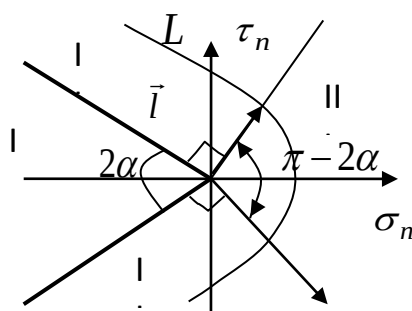


Рис. 4. Три области деформирования горных пород

Вывод.

Построена механическая и математическая модели поведения горных пород при сдвиге.

Решена задача о деформировании массива пород вокруг выработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цвелодуб И.Ю. О разномодульной теории упругости // Прикладная механика и техническая физика. - 2008. – Т.49. - №1(287). – С.157-164.
2. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. - М.: Наука. - 1982. – 320с.
3. Христианович С.А., Шемякин Е.И. О плоской деформации пластического материала при сложном нагружении // Известия Российской академии наук. - Механика твердого тела. - 1969. - № 5. - С. 138.
4. Открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин, М. А. Розенбаум. - Опубликовано В БИ. – 1992. - № 1.
5. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. - СПб.: Наука. - 2001. - 343с.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко, 2017

ВЛИЯНИЕ СЖАТИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В БЛОЧНЫХ СРЕДАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Анатолий Георгиевич Черников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник, тел. (383)335-96-54

Евгений Николаевич Шер

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Согласно концепции М.А. Садовского при описании динамического деформирования породного массива необходимо учитывать его блочное строение. Проведенные ранее исследования волноводных свойств одномерных моделей блочных сред, показали, что скорости маятниковых волн, возникающих при ударном нагружении, определяются массой блоков и существенно зависят от реологических свойств прослоек. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния внешнего сжатия блочной среды на распространение маятниковых волн.

Ключевые слова: блочный массив, сейсмические волны, горное давление, физическое моделирование.

COMPRESSION EFFECT ON SEISMIC WAVE PROPAGATION IN BLOCK MEDIA UNDER PULSED LOAD

Anatoly G. Chernikov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, tel. (383)335-96-54

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Principal Researcher, tel. (383)335-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Under M.A. Sadovsky's concept when describing dynamic deformation of a rock mass it is imperative to consider its block structure. The earlier investigations into wave-guide properties of one-dimensional block-medium models revealed that velocities of pendulum-type waves induced by percussion loading depend on a block mass and rheological interlayer properties, in particular. The present paper reports experimental data on the effect of external block compression on propagation of pendulum-type waves.

Key words: block mass, seismic waves, rock pressure, physical simulation.

Согласно концепции М.А. Садовского породный массив представляет собой систему вложенных друг в друга блоков разного масштабного уровня [1] разделенных прослойками. Часто прослойки между блоками представлены более слабыми, трещиноватыми породами. Наличие таких податливых прослоек приводит к тому, что деформирование блочного массива, как в статике, так и в динамике происходит в ос-

новном за счет деформации прослоек, что приводит к выделению в сейсмическом отклике на импульсное воздействие низкочастотных волн маятникового типа [2, 3] .

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования волноводных свойств одномерных моделей блочных сред, представленных цепочкой упругих стержней, разделенных податливыми прослойками [4-6]. Показано, что для описания распространения волн в таких средах хорошим приближением является представление о движении блоков как недеформируемых тел. При этом достаточно точно описываются возникающие при импульсном воздействии низкочастотные составляющие волны. Как показали эксперименты, высокочастотные составляющие волн, определяемые собственными колебаниями блоков достаточно быстро затухают.

Сравнение данных расчетов по разработанным моделям с экспериментом показали, что скорость распространения маятниковых волн, период, степень их затухания определяются массой блоков и существенно зависят от реологических свойств прослоек, которые в свою очередь зависят от внешнего, горного давления. Наличие взаимосвязи величины горного давления и параметров сейсмических волн открывает возможность контролировать горное давление по данным сейсмического каротажа.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния внешнего сжатия блочной среды на процесс распространения волн деформации при ударном нагружении. Аналогичное исследование было проведено ранее на примере одномерной сборки девяти силикатных кирпичей [7].

В данной работе в качестве модели блочной среды была использована вертикально расположенная одномерная сборка девяти блоков с размерами 88x125x250 мм, изготовленных из оргстекла и размещенных в гидравлическом прессе. В сборке блоки располагались крест на крест. На семи блоках (1-7-мом) были установлены акселерометры KD91. Вся сборка приводилась в сжатое состояние при помощи гидравлического пресса, что создавало в сборке сжатие до 60 кН, или 2000 кПа из расчета на площадь большой грани блока. На верхний блок усилие передавалось через муфту, внутри которой располагался ударник, с закрепленным на нем акселерометром 8309 фирмы Brüel & Kjær для фиксирования интенсивности удара. Все акселерометры были подключены через усилители заряда 2635 фирмы Brüel & Kjær к АЦП Е-1440 и далее к компьютеру, на котором производилась запись сигнала и хранение данных.

Моделирование действия ослабленных контактов между блоками породного массива проводилось введением прослоек из одного и трех слоев вакуумной резины площадью 125*125 мм и толщиной 1мм. Пример записи ускорений блоков № 1, 4, 7 в сборке без прослоек приведен на рис. 1.

Характерным для движения блоков вблизи точки приложения импульсного нагружения является возбуждение их собственных колебаний. По мере распространения волны возмущения по сборке такие колебания затухают и тем быстрее, чем больше их частота. Дальность распространения высокочастотных колебаний увеличивается с ростом сжатия сборки. Вдали от точки удара в колебаниях блоков выявляется низкочастотная волна маятникового типа, определяемая их взаимодействием через податливые прослойки.

В результате обработки осциллограмм ускорений блоков определялись скорости распространения волн вдоль сборки. Скорость распространения сигнала в эксперименте определялись по моментам его вступления. Скорость низкочастотной маятниковой волны определялась по моментам достижения максимального значения первого пика ускорения. Такая обработка проводилась после фильтрации низких частот сиг-

нала с пороговой частотой 2.6 кГц. Это делалось для того, чтобы отделить высокочастотную часть сигнала, порождаемую возбуждением собственных колебаний блоков.

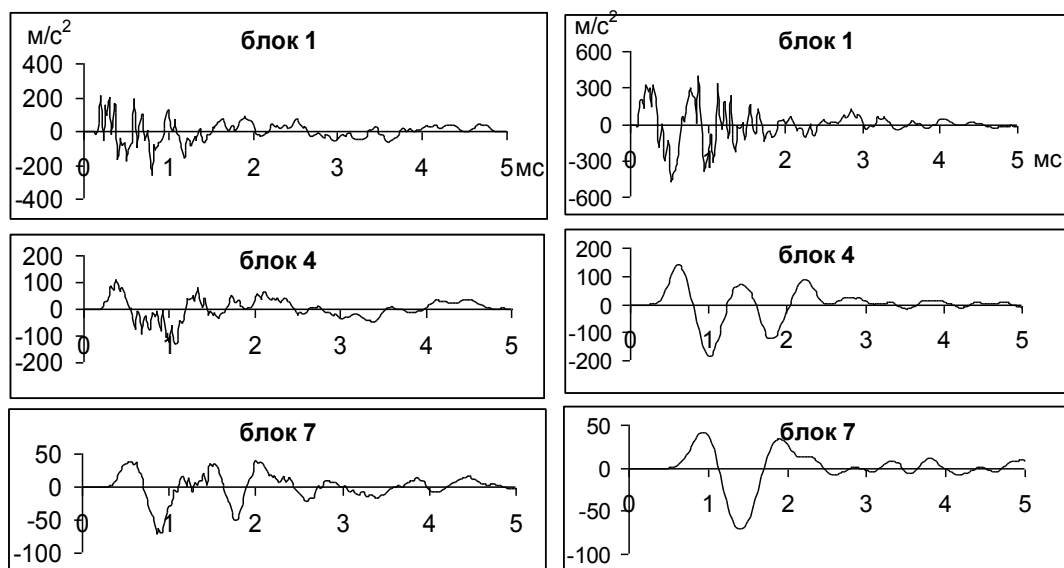


Рис. 1. Осциллограммы ускорений колебаний 1,4,7-го блоков в сборке, сжатой давлением 10 кПа (слева) и 1000 кПа при ударном нагружении

Графики зависимостей значений скоростей распространения сигнала C_s и маятниковой волны C_m от степени сжатия сборки блоков из оргстекла при разных видах прослоек приведены на рис.2. Кривая 1 соответствует скорости C_s , 2 и 3- скоростям маятниковых волн в сборках блоков без прослоек и с прослойками из вакуумной резины. Для сравнения с этими зависимостями на рис. 2 приведены также графики зависимостей значений скоростей распространения сигнала (кривая 4) и маятниковой волны (кривая 5) от степени сжатия сборки кирпичей.

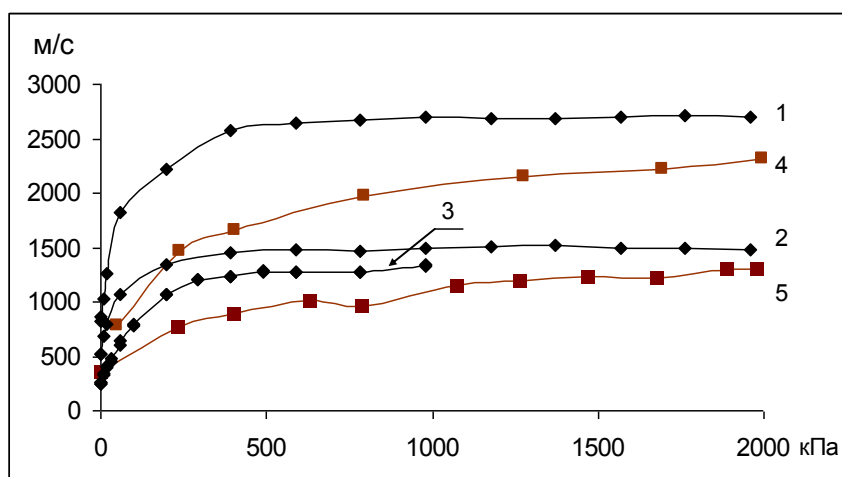


Рис. 2. Зависимости скоростей распространения сигнала и маятниковой волны в сборках блоков из оргстекла (кривые 1, 2, 3) и в сборках из силикатных кирпичей (кривые 4, 5)

Из приведенных данных следует, что скорость распространения сигнала по сборке из кирпичей (кривая 4) заметно меньше продольной скорости упругих волн в материалах кирпичей, равной 3100 м/с. С ростом сжатия сборки до 400 кПа наблюдается быстрый ее рост, который при увеличении сжатия постепенно замедляется. В сборках из блоков оргстекла с ростом сжатия большие изменения скорости распространения сигнала так же наблюдаются в интервале давления сжатия сборки от нуля до 400 кПа. При этом величина ее приближается к значению продольной скорости звука в оргстекле – 2600 м/с. Дальнейшее увеличение сжатия слабо влияет на величину скорости.

Общим в характере зависимостей скорости распространения маятниковой волны от внешнего сжатия является ее быстрый рост на начальной стадии увеличения сжатия. Такой рост в сборках блоков из оргстекла наблюдается до сжатия давлением в ≈ 400 кПа и при большем сжатии прекращается. В случае сборки из кирпичей увеличение скорости после начальной стадии роста сжатия наблюдается во всем диапазоне его изменения. Такое отличие в поведении волн в разных сборках можно объяснить разной шероховатостью контактирующих поверхностей кирпичей и блоков из оргстекла. Очевидно, что поверхности кирпичей больше искривлены. При соприкосновении кирпичей их взаимодействие происходит в локализованных точках. По мере роста силы сжатия сборки площадь контактов возрастает, что приводит к росту суммарной жесткости прослойки и соответственно к росту скорости маятниковой волны. В случае блоков из оргстекла такой рост площади контакта с увеличением сжатия происходит быстрее и при сжатии давлением в ≈ 400 кПа площадь контакта достигает, по-видимому, максимума. При этом скорость сигнала сравнивается с продольной скоростью звука, а скорость маятниковой волны стабилизируется на уровне, зависящем от податливости прослойки. Влиянием шероховатости можно объяснить и тот факт, что скорости маятниковых волн в сборках из кирпичей заметно меньше таковых в сборках из оргстекла. Возможно, при большем сжатии сборки из кирпичей значения скорости распространения сигнала и маятниковой волны выйдут на постоянный уровень. В эксперименте это проверить не удалось из-за растрескивания кирпичей.

В заключение отметим:

1. Проведенные эксперименты на модели блочной среды в виде сборки блоков из оргстекла подтвердили полученные ранее результаты, такие как:

- Спектр возмущений в блочной среде, возникающих при импульсном нагружении, определяется частотами собственных колебаний отдельных блоков и частотным спектром их коллективных движений.

- По мере распространения возмущений по сборке собственные колебания затухают и тем быстрее, чем больше их частота.

- Вдали от точки удара в колебаниях кирпичей выявляется низкочастотная волна маятникового типа, определяемая их взаимодействием через податливые прослойки.

2. Внешнее сжатие блочной среды оказывает большое влияние на скорости распространения волн, их частотный спектр. Эти параметры могут быть использованы для контроля над изменениями внешнего сжатия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829–832.

2. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа U_μ // ДАН СССР. – 1993. – Т. 333. – № 4. – С. 3–13.
3. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. – 1996. – № 4. – С. 3–38.
4. Александрова Н. И. О распространении упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении // ФТПРПИ. – 2003. – № 6. – С. 38–47.
5. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. – 2004. – № 6. – С. 49–57.
6. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5. – С. 67–74.
7. Шер Е. Н., Черников А. Г. Экспериментальное исследование влияния сжатия на распространение волн в блочных средах при ударном нагружении // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 287–292.

© А. Г. Черников, Е. Н. Шер, 2017

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАЗДЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ СТАНЦИИ ЗАКРЫТОГО ТИПА МЕТРОПОЛИТЕНА С ДВУХПУТНЫМ ТОННЕЛЕМ

Лаврентий Александрович Кияница

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, инженер лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: ivlugin@isd.ru

Впервые предложена система раздельной вентиляции станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем. Определены требования, предъявляемые к системе раздельной вентиляции. Обоснован допустимый диапазон рециркуляции воздуха из путевого отсека в пассажирские помещения станции. Представлена схема системы раздельной вентиляции станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем, определены ее параметры работы в теплый и холодный период года.

Ключевые слова: метрополитен, станция закрытого типа, пассажирские помещения, двухпутный тоннель, система раздельной вентиляции, рециркуляция воздуха, микроклимат.

INDIVIDUAL VENTILATION SYSTEM DIAGRAM AND JUSTIFICATION OF OPERATION PARAMETERS OF THE AIR RECIRCULATION SYSTEM FOR CLOSED-TYPE SUBWAY STATIONS WITH TWO-TRACK TUNNEL

Lavrenty A. Kiyantsa

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Post-graduate, Engineer, Mine Aerodynamics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Assistant Professor, Principal Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@isd.ru

The authors are pioneers to propose the system of individual ventilation of a closed-type subway station with two-track tunnel. The requirements for the individual ventilation system are identified. The admissible air circulation in the track section-passenger platform range is computed. The diagram of an individual ventilation system is designed for a closed-type subway station with two-track tunnel. Operation parameters of the system are determined for warm and cold seasons, in particular.

Key words: subway, closed-type station, two-track tunnel, individual ventilation system, air recirculation.

Современные мировые тенденции строительства метрополитенов заключаются в увеличении доли возведения станций закрытого типа и двухпутных тоннелей в общем объеме строительства. В качестве примера можно привести строительство в РФ участка двухпутного тоннеля Фрунзенском радиусе в Санкт-Петербурге и Кожуховской линии в Москве. Отличием станции закрытого типа от станций других типов является наличие перегородки, разделяющей пассажирские помещения метрополитена (в первую очередь пассажирскую платформу) и путевого отсека.

Задача обеспечения микроклимата в подземных сооружениях метрополитена решается системами тоннельной и станционной вентиляции. Выбор параметров работы системы вентиляции зависит от расчетного расхода воздуха, который в свою очередь определяется на основании величины выделений тепла, влаги и других вредностей в перегонных тоннелях и на станциях.

Основное отличие вентиляционного режима станции закрытого типа от других видов станций заключается в аэродинамической изоляции пассажирских помещений станции от путевого отсека и перегонных тоннелей, соответственно тепло- влагоизбытки почти не попадают из туннеля и путевого отсека в пассажирские помещения. Это приводит к существенной разнице по требуемому воздухообмену на станции и в тоннеле и, соответственно, разделению систем вентиляции станции закрытого типа и двухпутного тоннеля [1].

Выбор производительности системы вентиляции по воздуху определяется на основе сведения теплового и влажностного баланса в пассажирских помещениях и в путевом отсеке. Параметры микроклимата на станциях и в тоннелях нормируются согласно [2, 3]. Требования по поддержанию температуры и относительной влажности воздуха в тоннеле и в пассажирских помещениях станции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нормируемые значения температуры и относительной влажности воздуха
в тоннеле и на станции

	Станция		Тоннель	
	Теплый	Холодный	Теплый	Холодный
Температура воздуха, °С	18 ÷ 28	10 ÷ 16	≤33 (≤35) ¹	5 ÷ 16
Относительная влажность, %	15...75			

¹ – в скобках приведено значение температуры для регионов с температурой наружного воздуха с обеспеченностью 0,95 [3] по параметрам А выше 24 °С.

Основными источниками тепlopоступлений на станции являются: а) пассажиры и персонал; б) эскалаторы; в) теплообмен между станцией и путевым отсеком; г) системы освещения; д) теплообмен с окружающим станцию грунтовым массивом; е) стационарное оборудование. Основными источниками тепlopоступлений в тоннеле и путевом отсеке являются: а) подвижный состав (поезда); б) пассажиры; в) освещение; г) кабель-каналы; д) теплообмен между станцией и путевым отсеком; е) стационарное оборудование; ж) совмещенные тягово-понижительные подстанции СТП (если отработанный вентиляционный воздух из СТП удаляется в тоннель; з) теплообмен с окружающим станцию грунтовым массивом. Основной источник влаговыделений и СО₂ в тоннеле и на станции – пассажиры.

Расход воздуха для систем общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха определяется расчетом согласно [4] в целях обеспечения санитарно-гигиенических норм. Расход воздуха следует определять отдельно для теплого и холодного периодов года и переходных условий из условия ассимиляции тепло- и влаговывделений и по массе выделяющихся вредных веществ, принимая большую из величин расхода воздуха.

Для пассажирских помещений станции закрытого типа (проектируемая станция «Гусинобродская» Новосибирского метрополитена), путевого отсека и двухпутного тоннеля ($l=1990$ м) определены суммарные среднечасовые тепlopоступления / тепlopотери q , кВт, и количество выделяющейся влаги W , кг/ч, и CO_2B , кг/ч (табл. 2).

Таблица 2

Суммарные среднечасовые тепlopоступления / тепlopотери
и количество выделяющейся влаги и CO_2

		Пассажирские помещения			Тоннель и путевой отсек		
Период года		Теп- лый	Переход- ный	Холод- ный	Теп- лый	Переход- ный	Холод- ный
1-ый год экс- плуатации	q , кВт	-396.49	-64.49	-59.24	299.06	963.25	961.94
	W , кг/ ч	42.81	25.56	18.72	240.3	134.84	53.4
	B , кг/ ч	13.86	13.86	13.86	60.07	60.07	60.07
Установивший- ся год эксплуа- тации	q , кВт	-45.47	-49.75	-95.43	947.7	963.64	1091.64
	W , кг/ ч	42.81	25.56	18.72	240.3	134.84	53.4
	B , кг/ ч	13.86	13.86	13.86	60.07	60.07	60.07

Для двухпутного тоннеля и путевого отсека расчетные расходы воздуха на вентиляцию составили: а) для теплого периода $78,93 \text{ м}^3/\text{с}$; б) для переходного периода $47,24 \text{ м}^3/\text{с}$; в) для холодного периода $20,22 \text{ м}^3/\text{с}$. Требуемый минимальный расход свежего воздуха для двухпутного тоннеля составляет $11,33 \text{ м}^3/\text{с}$. Определены расчетные расходы воздуха на вентиляцию для пассажирских помещений станции закрытого типа и доли рециркуляции воздуха из путевого отсека в пассажирские помещения станции (табл. 3).

Для восполнения теплонедостатков в пассажирских помещениях станции закрытого типа (см. табл. 1) предложена схема раздельной вентиляции станции закрытого типа и двухпутного тоннеля с рециркуляцией тоннельного воздуха в пассажирские помещения станции, позволяющая снизить нагрузку на воздухонагреватели системы вентиляции станции (рисунок) и получить экономию тепловой энергии до 43% в холодный период года.

Таблица 3

Расчетные расходы воздуха на вентиляцию пассажирских помещений станции закрытого типа и доля рециркуляции тоннельного воздуха

	1-ый год эксплуатации			Режим установившейся эксплуатации		
Период года	Теплый ¹	Переходный	Холодный	Теплый	Переходный	Холодный
Расчетный расход воздуха на вентиляцию L , м ³ /с	9,94	9,94	9,94	9,94	9,94	9,94
Расход свежего воздуха $L_{св}$, м ³ /с						
Минимально допустимый расход свежего воздуха $L_{св}^{min}$, м ³ /с	$\frac{6,17}{2,57}$	$\frac{2,60}{2,57}$	$\frac{3,98}{2,57}$	$\frac{6,71}{2,57}$	$\frac{2,57}{2,57}$	$\frac{4,29}{2,57}$
Доля рециркуляции тоннельного воздуха α , %	37,9	73,8	60,0	32,5	74,1	56,8

¹ – дополнительно необходимо электроотопление.

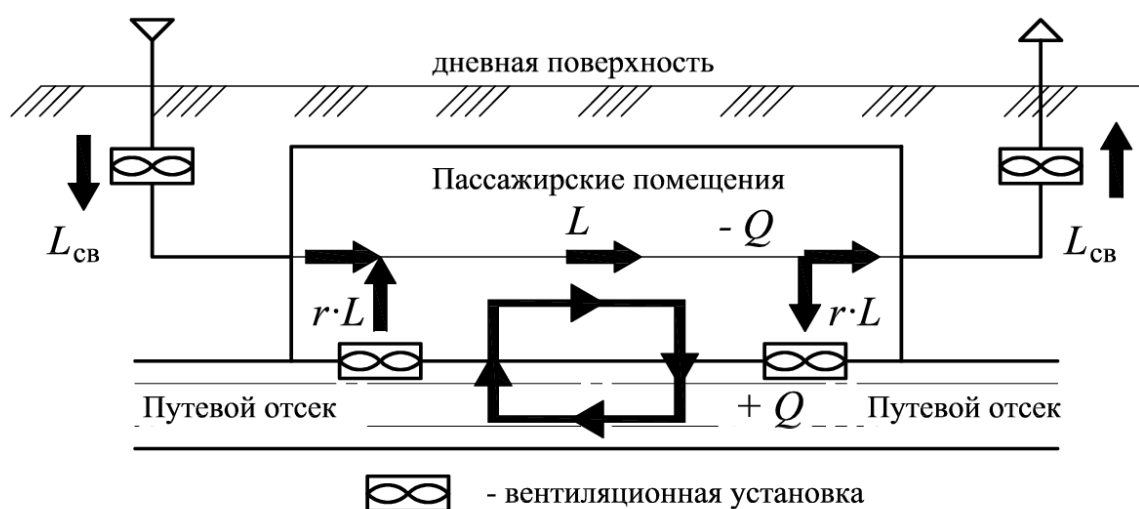


Рис. Схема раздельной вентиляции станции закрытого типа и двухпутного тоннеля с рециркуляцией тоннельного воздуха в пассажирские помещения станции

Выводы: 1) Определены среднечасовые тепlopоступления / тепlopотери и количество выделяющейся влаги и CO_2 , подлежащие ассимиляции системой вентиляции пассажирских помещений станции закрытого типа и двухпутного тоннеля. 2) Определены расчетные расходы воздуха на проветривание двухпутного тоннеля и расчетные расходы свежего и тоннельного воздуха для проветривания станции; 3) предложена

схема раздельной вентиляции станции закрытого типа и двухпутного тоннеля с рециркуляцией тоннельного воздуха в пассажирские помещения станции, которая позволяет снизить тепловую нагрузку на воздухонагреватели системы вентиляции и экономить до 43% тепловой энергии в холодный период.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кияница Л.А. Тепло-влажностный баланс как определяющий расчетный параметр раздельной вентиляции метрополитена со станциями закрытого типа / Л.А. Кияница, И.В. Лугин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — Новосибирск, 2016, — №3, том 2. — С. 86 – 91.
2. СП 120.13330.2.12. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 260 с.
3. СП 2.5.2623-10 Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. Изменения и дополнения N 1 к СП 2.5.1337-03 [Текст] : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010 : дата введ. 08.06.2010. — М.: [б.и.], 2010. — 15 с.
4. СП 60.13330.2.12. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 76 с.

© Л. А. Кияница, И. В. Лугин, 2017

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАК ЭЛЕМЕНТ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Аркадий Васильевич Леонтьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: leon@misd.ru

Изложены основы стратегии разработки системы геомеханического мониторинга, учитывающей фактор неопределенности в познании особенностей конкретной геомеханической обстановки, а также возможности ее совершенствования на базе современных информационных технологий.

Ключевые слова: массив горных пород, система геомеханического мониторинга, управляемое геомеханическое пространство.

GEOMECHANICAL MONITORING AS A COMPONENT OF MINING TECHNOLOGY

Arkady V. Leontiev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 173, e-mail: leon@misd.ru

Strategic fundamentals in development of the geomechanical monitoring system with consideration for uncertainty factor in specific features of a certain geomechanical environment and its perspective updating based on the state-of-the-art information technologies are set forth in the paper.

Key words: rock mass, geomechanical monitoring system, controlled geomechanical environment.

Создание рациональной и эффективной технологии подземной добычи полезных ископаемых предполагает разрешение противоречий между растущими техническими возможностями воздействия на земные недра и реакцией окружающей среды на это воздействие. Технология является рациональной, если ее применение не вызывает в массиве горных пород нежелательных процессов и эффективной – если в рамках этой технологии в максимальной степени используются технические возможности современных горных машин и оборудования. Успешное освоение глубоких месторождений и создание на их запасах крупных горнодобывающих предприятий, являющихся, как правило, сырьевыми центрами территориально-производственных комплексов, возможно только в тех случаях, когда для данных горно-геологических условий найдена рациональная и эффективная технология разработки. Поиск этой, зачастую единственно возможной, а нередко и уникальной технологии, представляет собой самый сложный конгломерат научных, технических, технологических, экологических, экономических и социальных проблем.

К такому пониманию проблемы поиска рациональных и эффективных технологий подземной разработки месторождений горная наука и практика шли длительным путем. В конечном итоге стало ясно, что для обоснования эффективных технологий

требуется постоянное обеспечение технических служб горнодобывающих предприятий информацией о состоянии и параметрах объекта разработки, используемых машинах и механизмах, о процессах их взаимодействия с окружающей средой и реакциях среды на это воздействие.

Сегодня система информационного обеспечения становится неотъемлемым атрибутом рационального использования недр, поскольку лежит в основе прогноза условий ведения горных работ, оперативного планирования и управления горными работами.

Существенным разделом этой системы является геомеханический мониторинг, под которым подразумевается комплекс методов и средств, обеспечивающих получение оперативной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива горных пород, осуществляемых с целью повышения эффективности и безопасности работ при эксплуатации размещенных в геомеханическом пространстве (ГП) производственных объектов.

В качестве последних рассматриваются шахты и рудники, глубокие карьеры, хранилища и другие подземные сооружения, находящиеся под существенным воздействием горного давления.

Под геомеханическим пространством будем понимать участок земной коры (отрабатываемый участок месторождения), оконтуренный некоторой замкнутой поверхностью, внутри которой заключен весь объем массива пород данного месторождения, в пределах которого велись и ведутся горные работы. Пространство, за которым осуществляется геомеханический мониторинг, будем называть управляемым геомеханическим пространством (УГП).

Основными составляющими геомеханического мониторинга являются:

- контроль - выявление участков УГП, в которых значения параметров НДС приближаются к предельно допустимым, и обоснование мер по нормализации этих значений;
- диагностика - исследование внутренних механизмов и закономерностей поведения УГП, обуславливающих его текущее НДС;
- прогноз - определение вероятных тенденций и эволюции геомеханической обстановки.

Начальные сведения о применениях геомеханического контроля относятся к 20 – 30-м годам прошлого столетия. В этот период были начаты инструментальные наблюдения за сдвигами горных пород в массиве, систематические изучения их прочностных и деформационных свойств, накапливались и обобщались наблюдения за формами проявления горного давления в подземных выработках. Методы и средства этих наблюдений, в основном, заимствовались из маркшейдерской и геологоразведочной практики.

На рубеже 60-х годов геомеханический контроль получил активное развитие, постепенно приобретая научную и практическую значимость в горном деле. Методы горной геофизики постепенно оформились в самостоятельную научную дисциплину; круг исследований расширился: более глубоко изучались природа и закономерности формирования в массиве горных пород естественных и искусственных физических полей, деформируемость горных пород в запредельном состоянии; детально изучались физико-механические параметры реальной геофизической среды такие как ползучесть, блочность, структура, неоднородность состава и др. и их роль в поведении породного массива. В связи с участвовавшими случаями проявления горного давления

в виде внезапных обрушений и горных ударов на шахтах и рудниках были созданы производственные службы контроля и прогноза состояния массива, которые по сей день ведут сбор и обобщение данных инструментальных наблюдений за НДС массива и используют эти сведения при решении практических задач.

Достаточно полные сведения о возникновении, развитии и применении методов и средств горной геофизики можно почерпнуть из [1–7].

В настоящее время при все возрастающей глубине горных работ и, как следствие, повсеместном ухудшении условий разработки месторождений, росте интенсивности динамических проявлений горного давления и обострении экологических проблем - с одной стороны; при ужесточении требований к качеству добываемого сырья и необходимости, как минимум, сохранения темпов и объемов добычи – с другой стороны, геомеханический мониторинг становится объективно необходимым элементом горной технологии, обеспечивающим новый уровень качества технологических решений.

Сложившийся к настоящему времени традиционный подход в оценке НДС массива состоит в следующем. Экспериментально или аналитически воспроизводится картина действующего поля напряжений в окрестности существующего либо проектируемого подземного сооружения. По какому-либо критерию прочности выносится суждение о безопасном состоянии массива или о возможном его разрушении вблизи выработанного пространства.

Для эффективного применения в горной практике сведений о величинах напряжений необходимо использовать их в качестве опорных значений при моделировании полей напряжений с обязательным учётом реальной структуры массива и физических свойств горных пород, как это, к примеру, предложено в [8]. Масштаб моделирования должен соответствовать величине контролируемого геомеханического объекта и приниматься в зависимости от характера решаемых в рамках исследований задач. Так расчёты прочности подземных сооружений и определение их оптимальных параметров должны быть основаны на использовании моделей отдельных участков, вмещающих выработки, стволы, очистное пространство. В процессе обоснования очередности и регламента горных работ целесообразно опираться на результаты оценки состояния массива в пределах шахтного поля, тогда как решение стратегических задач по отработке протяжённых или сближенных месторождений и охране наземных сооружений потребует построения полей напряжений для всей зоны геодинамического опорного давления.

Очевидно, инструментальный контроль естественных напряжений в породных массивах необходим на всех стадиях ведения горных работ. Однако он не обеспечивает решения проблемы предотвращения аварий и катастроф, включая горные удары. Диагностика реальных движений породного массива, обусловленных сложной иерархией процессов самоорганизации в нём, в нынешних условиях возможна путём создания интеллектуальных систем геомеханического мониторинга. Последние, обеспечивая совмещение наблюдений за множеством геофизических процессов, прямо и косвенно характеризующих НДС массива горных пород и интегрируя в рамках своего методологического наполнения модели различной математической природы для анализа полученной информации, позволят достигнуть позитивных результатов в прогнозировании катастрофических событий на горных предприятиях.

Программу дальнейшего развития геомониторинга, фактически, сформулировал академик М.А. Садовский в [9], который главными направлениями в геомеханике определил:

- систематическое изучение самоорганизации природной среды, ее структуры и режимов деформирования;
- разработку статистических моделей структурных сред, чтобы можно было исследовать во времени реакцию системы на возмущение, ее кинетические характеристики и т.д.;
- исследование самого структурного элемента – накопление в нем упругой энергии, релаксацию напряжений, условия локального разрушения в процессе деформирования среды, в которой структурный элемент находится и с которой постоянно обменивается энергией".

Решение перечисленных задач требует мощного методологического и технического вооружения исследований и приводит к необходимости создания систем контроля, по сложности адекватных наблюдаемым процессам движения породного массива.

Перед системой геомониторинга (СГМ) ставятся две основные задачи. Первая – своевременное обнаружение критических ситуаций, развитие которых может привести к катастрофическим проявлениям горного давления (горным ударами, техногенным землетрясениям, внезапным выбросам и обрушениям). Вторая – поиск и обоснование оптимальной стратегии управления горным давлением с учетом научно-технических, экономических экологических и социальных факторов.

По характеру исполнения СГМ должна рассматриваться как индустриальная система, которая: осуществляет мониторинг НДС без прерывания на управляемом объекте основного технологического процесса; имеет гибкую топологическую конфигурацию, разворачиваемую в соответствии с требованиями технологического процесса; содержит средства адаптации методологического наполнения к изменяющейся геомеханической ситуации и имеет простой доступ со стороны соответствующих производственных служб. На рисунке представлен пример структурно-функциональной схемы СГМ, предлагаемой к реализации для группы рудников Горной Шории.

Стратегия разработки СГМ должна учитывать фактор неопределенности в познании особенностей конкретной геомеханической обстановки и строиться с расчетом на эволюционное её совершенствование на базе современных информационных технологий.

Сравнительный анализ исследовательских и промышленных систем класса СГМ, работающих в США, ЮАР, странах Западной Европы, Японии, позволяет сделать следующие выводы относительно заложенных в них концепций [10]:

- совмещение наблюдений одновременно за множеством процессов различной физической природы, непосредственно и косвенно характеризующих НДС массива горных пород;
- интегрирование в рамках методологического наполнения моделей различной математической природы;
- непрерывное накопление данных об общей картине, характеризующей состояние геомеханического пространства;
- развертывание широкой сети станций наблюдения (несколько сотен), что вызвано необходимостью достижения требуемого качества мониторинга;
- построение физической структуры СГМ в виде открытой иерархической сети.

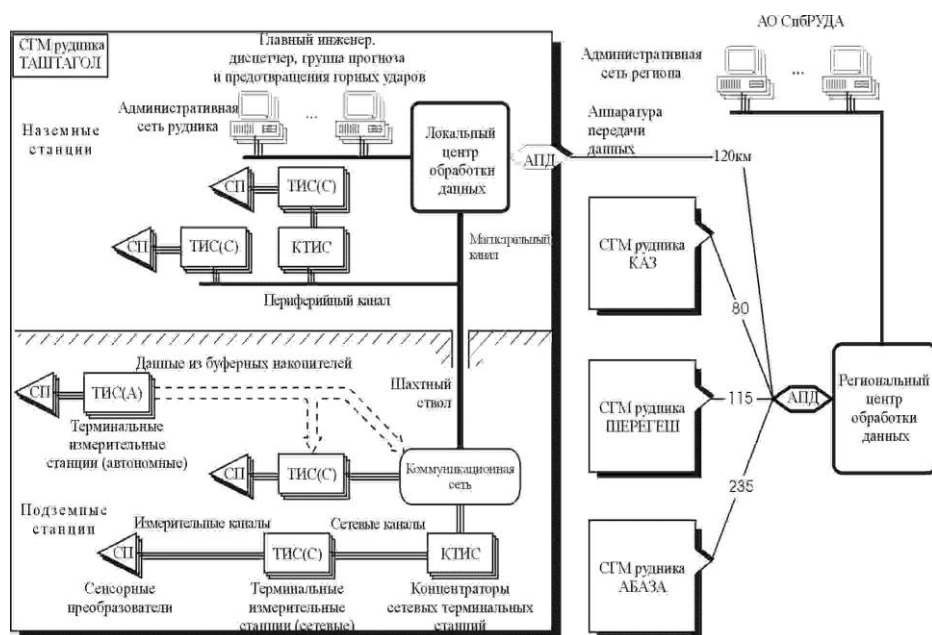


Рис. Структурно-функциональная схема СГМ для месторождений Горной Шории

Вытекающая отсюда сложность организации СГМ как технической системы предъявляет высокие требования к обоснованию общесистемной концепции, выбору проектных решений, учету человеческих факторов и окружающей среды, оцениванию перспектив внедрения и развития системы.

Со стороны СГМ геомеханическое пространство – естественная, плохо управляемая механическая система, труднодоступная для наблюдения, физические процессы в которой развиваются в широком диапазоне скоростных масштабов, самоорганизующаяся под воздействием внешних факторов. Исследование сложной иерархии процессов самоорганизации, обусловленных флуктуациями энергетических потоков в массиве, является универсальным методом геомеханического мониторинга. Эти процессы приводят к проявлению в массиве таких особенностей как: изменение пространственной структуры с образованием блочной геофизической среды; коллективное упорядоченное или хаотическое движение блоков; изменение конфигурации полей напряжений с образованием микротрещин, трещин, нарушений; возникновение периодических и квазипериодических колебаний в блоках. При определенных условиях данные проявления могут носить характер катастрофы как следствие нелинейных механических эффектов, вызванных развитием многоуровневых отношений и связей между процессами самоорганизации в массиве.

Наличие нелинейных эффектов в поведении массива, как сложной механической системы, следует ожидать не только при оценивании НДС, но и в процессе управления этим состоянием.

Общие идеи по организации соответствующего методологического наполнения СГМ могут быть сформулированы следующим образом.

Система оперирует с множеством регистрируемых в массиве данных, которые представляют физические процессы, сильно коррелированные с контролируемыми нелинейными механическими явлениями: поля напряжений, процессы деформации и

смещения, акустическая и электромагнитная эмиссия, сейсмические волны и электрическая проводимость.

Система оперирует с предысторией катастрофических событий, которая содержит информацию о геомеханической обстановке накануне катастроф: измеряемые и оцениваемые параметры НДС, используемые методы и результаты оценивания и прогнозирования НДС.

Система оперирует с развивающимся (открытым) комплексом математических моделей измерения, оценивания и прогнозирования НДС. Он включает в себя детерминированные и стохастические модели, адаптируемые средствами СГМ к статистическим свойствам натурных данных, как-то: модели механики сплошной, дискретной и анизотропной сред, модели с разрывом сплошности, динамические иерархические модели дефектообразования, геофизические модели обратных задач рассеяния, модели многомерного статистического анализа, модели оптимального управления и пр. Так как прогностическая информация содержится, главным образом, в нюансах и особенностях поведения контролируемых физических процессов (в устойчивых режимах, как правило, отсутствует свободная составляющая прогноза), следовательно, особое внимание в системе должно уделяться совершенным статистическим моделям обработки измерительной информации, а также статистическим теориям игр, принятия решений, планирования эксперимента.

И наконец, методологическое наполнение системы геомониторинга на верхнем структурном уровне следует организовывать в виде специализированной экспертной системы, которая наряду с вышеприведенными формализованными моделями оперирует также с эвристическими процедурами, базирующимися на практическом опыте экспертов-профессионалов. Погружение методологического наполнения СГМ в экспертную систему позволяет качественно изменить существующую практику оценки удароопасности по тривиальным полуэмпирическим моделям и недостаточно обоснованным методикам, как правило, не учитывающим динамику геомеханической обстановки. А именно, позволяет в производственных условиях обеспечить доступ в реальном времени к фундаментальным модельным построениям в области механики горных пород и анализа геофизической информации, отвечающим практическим постановкам сложных по своей природе задач контроля горного давления.

Таким образом, конструктивная позиция в отношении прогноза катастрофических событий в породном массиве представляется состоящей в том, что к решению этой сложной проблемы следует двигаться последовательно. Необходимо реализовать качественный сбор геофизической информации, обеспечить статистический анализ данных непрерывных наблюдений, а также адаптацию и самоорганизацию геомеханических моделей, процедуры контроля состояния массива, и, наконец, построить развивающуюся интегрированную экспертную систему диагностики и прогноза НДС, позволяющую объединить сложные модельные представления о геомеханической ситуации с эвристическими подходами и неформализованными знаниями экспертов.

Образно говоря, стратегия разработки СГМ должна заключаться в создании технической системы, способной "обучаться жить" в квазиреальном времени по законам управляемого геомеханического пространства.

Тиражированию систем мониторинга производственного назначения (доступных по стоимости и надёжных в эксплуатации) неизбежно должен предшествовать этап создания на одном из действующих горнодобывающих предприятий СГМ исследовательского типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ямшиков В.С. Контроль процессов горного производства. – М.: Недра, 1989.
2. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Коллективная монография / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин, А.В. Леонтьев, Л.А. Назаров и др.; отв. ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.
3. Деструкция Земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. Коллективная монография / В.Н. Опарин, А.А. Козырев, А.В. Леонтьев, А.А. Барях и др.; отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.
4. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Труды научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск: Изд. Института горного дела СО РАН, 2006, 2008, 2010, 2011, 2013.
5. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. Коллективная монография / В.Н. Опарин, Б.Д. Аннин, В.И. Востриков и др.; отв. ред. В.Л. Шкуратник. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 320 с.
6. Методы и системы сейсμοдеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Коллективная монография. Том I / В.Н. Опарин, В.П. Потапов, А.А. Глухов и др.; отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 304 с.
7. Методы и системы сейсμοдеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Коллективная монография. Том II / В.Н. Опарин, А.А. Маловичко, Е.Н. Шер, В.М. Жигалкин и др.; отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – 261 с.
8. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Шурина Э.П. Определение полей напряжений и деформаций в породном массиве на основе решения обратных задач // ФТПРПИ. – 2001, – №1.
9. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды. – М.: Вестник АН СССР, 1983, №1.
10. Беляков В.Г., Леонтьев А.В., Ярославцев А.Ф. Современные требования к информационной и методологической структуре систем геомеханического мониторинга. // Проблемы геотехнологии и недроведения. – Екатеринбург, УрО РАН, 1998.

© А. В. Леонтьев, 2017

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АДАПТИВНЫХ РАЗНОСТНЫХ СЕТОК К ЗАДАЧЕ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Дмитрий Сергеевич Евстигнеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (983)127-88-52, e-mail: dima503@pochta.ru

Реализован метод адаптивных разностных сеток, динамически связанных с решением уравнения Раппопорта-Лиса, учитывающей действия капиллярных и гравитационных сил.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, адаптивные сетки, нефть.

APPLICATION OF ADAPTIVE DIFFERENCE GRID TO TWO-PHASE FILTRATION PROBLEM IN OIL-FIELD DEVELOPMENT

Dmitry S. Evstigneev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher of Mining Machinery and Geotechniques Research Center, tel. (983)127-88-52, e-mail: dima503@pochta.ru

The researcher realizes the method for adaptive difference grids dynamically related to solution of Rappaport-Fox equation accounting for capillary and gravity force effects.

Key words: two-phase filtration, adaptive grids, oil.

В нефтяном пласте нефть движется по пласту-коллектору к добывающей скважине под действием перепада давления. Движение происходит при условии, что в пласте давление выше, чем на забое скважины. Впоследствии пластовое давление постепенно снижается и для его поддержания требуется проведение специальных мероприятий.

Восполнение энергии пласта и обеспечение продвижения нефти к добывающей скважине происходит методом искусственного поддержания внутрипластовой энергии. Основными источниками пластовой служат энергии:

- напора пластовой воды (краевой или подошвенной);
- расширения растворенного в нефти газа;
- упругости жидкости и породы;
- гравитационного напора нефти.

При водонапорном режиме эксплуатации залежи, в пласт закачивается вода под большим давлением и тем самым обеспечивается необходимый перепад давления для продвижения нефти к добывающей скважине. В зависимости от возникающего перепада давлений и фильтрационных характеристик пласта возникают области, в которых, при совместном движении несмешивающихся флюидов, капиллярными и гравитационными силами можно пренебречь. В этом случае Бакли и Левереттом была предложена модель фильтрации применяемая для прогноза добычи нефти на месторождениях [1]. Согласно предложенной модели, фронт насыщенности терпит разрыв на границе двух фаз: воды и нефти. Последующим усовершенствованием модели Бакли-Леверетта стала модель Раппопорта-Лиса. В ней действие капиллярных сил про-

является в основном вблизи фронта вытеснения, где градиенты насыщенности велики и изменяются непрерывно.

Для отыскания разрывных решений существуют два подхода: явный и неявный. Недостаток метода с явным выделением разрыва заключается в необходимости выделения положения разрыва на каждом временном слое [2,3]. Однако при больших деформациях фронта разрыва неравномерные расчетные сетки сильно искажаются, и возникает необходимость их периодической перестройки [2,4]. При неявном методе отслеживания фронта разрыва вводится некая пространственная функция-идентификатор [3,4], и положение разрыва совпадает с линией определенного уровня этой функции или находится в области ее максимального градиента. Существует группа методов, где в расчетную схему включен механизм размытия разрыва [5], а также схемы сквозного счета типа С. К. Годунова [4,6], в которых потоки через боковые грани расчетной ячейки определяются из решения задачи о распаде произвольного разрыва.

В серии работ, посвященных построению адаптивных разностных сеток, динамически связанных с решением [7-11], предлагается метод, в котором с помощью взаимно-однозначного преобразования координат осуществляется переход от декартовой системы координат к криволинейной, где для численного решения задачи используются расчетные сетки с фиксированными узлами. В физическом пространстве им соответствуют сетки с тем же общим числом узлов, но с управляемым распределением, что позволяет концентрировать их в областях, содержащих большие градиенты и разрывные решения. Переход к нестационарной системе координат избавляет от проблем, связанных с подвижными границами, при этом решения не содержат разрывов, однако в этом случае искомыми являются не только сеточные функции, но и координаты узлов сетки. Распространим данный подход к описанию движения несмешивающихся флюидов в нефтяном пласте, описываемому уравнением Раппопорта-Лиса.

Систему уравнений двухфазной фильтрации составляют: закон Дарси, уравнения баланса масс, уравнения несжимаемости для общего потока и капиллярного давления. В случае одномерного движения она может быть сведена к одному уравнению для водонасыщенности параболического типа, получившему название уравнения Раппопорта-Лиса [1]:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ f(s) \cdot \left[V(t) + k \cdot \frac{k_1(s)}{\mu_1} \left(\frac{\partial p_k}{\partial x} - \Delta \gamma \sin \alpha \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где s – водонасыщенность, $f(s) = k_2(s)/(k_2(s) + \mu_0 \cdot k_1(s))$ – потоковая функция Леверетта; $\mu_0 = \mu_2/\mu_1$; $\Delta \gamma = \gamma_2 - \gamma_1$; $V(t) = w_1 + w_2$ – суммарная скорость фильтрации флюидов, не зависящая от пространственной переменной; m – коэффициент пористости; k – абсолютная проницаемость среды; p_k – капиллярное давление, μ_1, μ_2 – коэффициенты динамической вязкости воды и нефти; $k_1(s), k_2(s)$ – относительные фазовые проницаемости по воде и нефти.

Капиллярное давление связано с водонасыщенностью соотношением:

$$p_k(s) = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{m}{k}} J(s),$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, θ – краевой угол смачивания, $J(s)$ – функция Леверетта.

Перепишем уравнение (1) в дивергентной форме с выделенными конвективным и диффузионным слагаемыми:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial \varphi(s)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K(s) \frac{\partial p_k}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где введены функции: $K(s) = k \frac{k_1(s)}{\mu_1}$, $\varphi(s) = f(s) \cdot [V(t) - K(s) \cdot \Delta \gamma \sin \alpha]$.

Положим, что в (2) $V(t) = \text{const}$ ($V(t) < 0$), и введем новые независимые переменные:

$$\bar{x} = x/L, \quad \bar{t} = V \cdot t / (L \cdot m),$$

где L – характерная длина. Перепишем (2) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial s}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial F(s)}{\partial \bar{x}} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(G(s) \frac{\partial s}{\partial \bar{x}} \right), \quad (3)$$

где $F(s) = f(s) \cdot \left[1 - \frac{k \Delta \gamma \sin \alpha}{\mu_1 V} \cdot k_1(s) \right]$, $G(s) = k_1(s) \cdot f(s) \cdot p'_k(s)$, $\varepsilon = \sigma \cos \theta \sqrt{m \cdot k} / (\mu_1 \cdot L \cdot V) > 0$ – малый параметр.

Пусть $(\bar{x}, \bar{t})$ – исходные независимые переменные. Переход к произвольной нестационарной системе координат осуществляется с помощью замены переменных общего вида $\bar{x} = \theta(q, \tau)$, $\bar{t} = \tau$, имеющей обратное невырожденное преобразование $q = \theta^{-1}(\bar{x}, \bar{t})$, $\bar{t} = \tau$. Частные производные зависимых переменных выражаются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial q}{\partial \bar{t}} \frac{\partial}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial \tau} + Q \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial q}{\partial \bar{x}} \frac{\partial q}{\partial q} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q}, \quad \frac{\partial^2}{\partial \bar{x}^2} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial q} \right), \quad (5)$$

где $\psi = \partial \bar{x} / \partial q$ – метрический коэффициент или коэффициент трансформации, показывающий во сколько раз изменяется исходная область; $\partial \bar{x} / \partial \tau$ – скорость движения системы координат, подлежащая в дальнейшем определению. Связав движение системы координат с особенностями решения, задаваемых в виде некоторой функции Q , получим уравнение обратного преобразования:

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} = -Q. \quad (6)$$

Функция Q фактически является параметром управления движения узлов. В (6) возьмем производную $\partial / \partial q$, в результате получим:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = -\frac{\partial Q}{\partial q}. \quad (7)$$

Используя замены переменных $\bar{x} = \theta(q, \tau)$ и $\bar{t} = \tau$, запишем уравнение (3) в новых переменных q, τ представляя дифференциальные уравнения в дивергентной форме:

$$\frac{\partial s}{\partial \tau} = \frac{\partial W}{\partial q} - \frac{\partial (Q \cdot s)}{\partial q} - \frac{\partial F(s)}{\partial q}, \quad (8)$$

$$W = \varepsilon \frac{G(s)}{\psi} \frac{\partial s}{\partial q}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = -\frac{\partial Q}{\partial q}, \quad (10)$$

$$\psi = \frac{\partial \bar{x}}{\partial q}, \quad (11)$$

где $q_0 < q < q_R$ при $\bar{x} \leq \bar{x} \leq x_R$, $t \geq 0$. Предполагается, что на каждый момент времени существует невырожденное преобразование:

$$x = \theta(q, \tau), \quad \theta(q_0, \tau) = x_0, \quad \theta(q_R, \tau) = x_R. \quad (12)$$

Вид функции Q в общем случае произволен, однако условия (12) налагают на него следующие требования $Q(q_0, \tau) = Q(q_R, \tau) = 0$. В работе [9] $Q(q, \tau)$ предлагается задавать в виде:

$$Q(q, \tau) = -D_0 \frac{\partial \psi}{\partial q} - Q_0 \frac{\partial}{\partial q} \left(\psi \left| \frac{\partial s}{\partial q} \right| \right). \quad (13)$$

Первый член в (13) ограничивает чрезмерное сближение расчетных узлов сетки, а второй обеспечивает их сгущение в области больших градиентов водонасыщенности s . Q_0 и D_0 – положительные произвольные константы.

Аппроксимацию системы уравнений (7)–(11), (13) осуществим по неявной разностной схеме интегро-интерполяционным методом (методом баланса) [12]. Для этого в расчетном пространстве $\Omega_{q,\tau}$ введем расчетную сетку с шагом h по переменной q и $\Delta \tau$ по переменной τ :

$$\omega = \left\{ (q_i, \tau^j), \left(q_{i+\frac{1}{2}}, \tau^j \right), h = q_{i+1} - q_i, q_{i+\frac{1}{2}} = q_i + \frac{h}{2}, \Delta \tau = \tau^{j+1} - \tau^j, i = 0, 1, \dots, N-1, j = 0, 1, \dots \right\}.$$

К целым узлам сетки (q_i, τ^j) отнесем переменную $\bar{x}_i^j$ и сеточные функции W_i^j , Q_i^j , F_i^j , а к дробным узлам $(q_{i+1/2}, \tau^j)$ – сеточные функции $\psi_{i+1/2}^j$, $s_{i+1/2}^j$.

$$\frac{s_{i+\frac{1}{2}}^{j+1} - s_{i+\frac{1}{2}}^j}{\Delta \tau} = \frac{(v)^{j+1} W_{i+1} - (v)^j W_i}{h} - \frac{(v)^{j+1} (Q \cdot s)_{i+1} - (v)^j (Q \cdot s)_i}{h} - \frac{(v)^{j+1} F_{i+1} - (v)^j F_i}{h}, \quad (14)$$

$$\frac{\psi_{i+\frac{1}{2}}^{j+1} - \psi_{i+\frac{1}{2}}^j}{\Delta \tau} = -\frac{(v)^{j+1} Q_{i+\frac{1}{2}} - (v)^j Q_i}{h}, \quad (15)$$

$$\frac{\bar{x}_{i+1}^{j+1} - \bar{x}_i^{j+1}}{h} = \psi_{i+\frac{1}{2}}^{j+1}, \quad (16)$$

$$W_i^j = \varepsilon \cdot \frac{G_i^j}{\psi_i^j} \cdot \frac{s_{i+\frac{1}{2}}^j - s_{i-\frac{1}{2}}^j}{h}, \quad i = 1, \dots, N-2, \quad (17)$$

$$Q_i^j = -D_0 \frac{\psi_{i+\frac{1}{2}}^j - \psi_{i-\frac{1}{2}}^j}{h} - Q_0 \frac{\psi_{i+\frac{1}{2}}^j |s_{i+1}^j - s_i^j| - \psi_{i-\frac{1}{2}}^j |s_i^j - s_{i-1}^j|}{h^2}. \quad (18)$$

Значения функций ψ_i^j и s_i^j в целых узлах определим через значение этих функций в дробных узлах по интерполяционной формуле:

$$y_i = \frac{\psi_{i-\frac{1}{2}} \cdot y_{i+\frac{1}{2}} + \psi_{i+\frac{1}{2}} \cdot y_{i-\frac{1}{2}}}{\psi_{i-\frac{1}{2}} + \psi_{i+\frac{1}{2}}}.$$

Полученная система разностных уравнений (14)–(18) нелинейна и может решаться различными способами, например с помощью итерационного метода Ньютона [10] или с помощью матричной прогонки с итерациями (ν) по нелинейности [8,12].

Опишем применение итерационного метода Ньютона к системе уравнений (14)–(18). Решение при переходе с временного слоя j на $j+1$ представляется в виде:

$$\begin{cases} \psi_i^{j+1} = \psi_i^j + \delta\psi_i^j \\ s_i^{j+1} = s_i^j + \delta s_i^j \end{cases} \quad (19)$$

Записывая разностные уравнения (14)–(18) относительно неизвестных приращений δs_i^j и $\delta\psi_i^j$, получаем на каждой итерации линейную систему алгебраических уравнений, решаемую методом последовательных прогонок. На первой итерации $\nu=1$ из уравнения ψ_i^j с помощью прогонки определяем приращение $\delta\psi_i^j$. Затем решая разностное уравнение для водонасыщенности s_i^j определяем приращение δs_i^j . Заканчивается итерация определением величин $\psi_i^{\nu+1} = \psi_i^\nu + \delta\psi_i^\nu$, $s_i^{\nu+1} = s_i^\nu + \delta s_i^\nu$ и осуществляется переход на следующую итерацию. Итерирование продолжается до выполнения условий:

$$\begin{cases} |\delta\psi_i^\nu| = |\psi_i^{\nu+1} - \psi_i^\nu| < \varepsilon_1 \cdot \psi_i^\nu + \varepsilon_2, \\ |\delta s_i^\nu| = |s_i^{\nu+1} - s_i^\nu| < \varepsilon_3 \cdot s_i^\nu + \varepsilon_4 \end{cases}, \quad 10^{-6} \leq (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \leq 10^{-3}.$$

Численный эксперимент. Для тестирования построенной схемы примем следующие параметры [13]: $F(s) = \frac{s^2}{s^2 + (1-s)^2}$, $G(s) = 4 \cdot s \cdot (1-s)$, $\varepsilon = 0.01$.

Начальные условия $t=0$: $s(x,0) = \{1-3x, 0 \leq x \leq \frac{1}{3}\} \cup \{0, \frac{1}{3} < x \leq 1\}$. Граничные условия $x=0$: $s(0,t)=1$. Расчетные параметры: число точек на отрезке $0 \leq x \leq 1$ $n=215$, шаг по времени $\tau=0,001$. Результат моделирования на момент безразмерного времени $t=0,2$ приведен на рисунке.

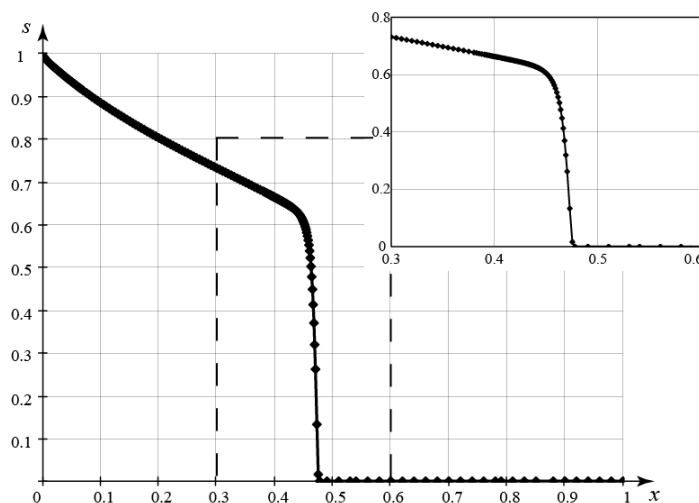


Рис. Профиль водонасыщенности на момент безразмерного времени $t=0,2$

Заключение. Применение метода адаптивных разностных сеток, динамически связанных с решением к задаче двухфазной фильтрации позволяет избежать появления разрывных решений в произвольной нестационарной системе координат и повысить точность расчёта в областях с большими градиентами и разрывными решениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 15-05-08824а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данаев Н.Т., Корсакова Н.К., Пеньковский В.И. Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов. – Алма-Ата, Казахский ун-т. 2005. 180 с.
2. Аганин А.А., Гусева Т.С. Численное моделирование контактного взаимодействия сжимаемых сред на эйлеровых сетках // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2012. Т. 154. Кн.4. С. 74-99.
3. Гусева Т.С. Численное решение задач взаимодействия жидкости и газа на эйлеровых сетках без явного выделения контактных границ // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. №15. С. 135-140.
4. Бугаго Н.Г., Кукуджанов В.Н. Обзор контактных алгоритмов // Изв. РАН. МТТ. 2005. – №1. С. 45–87.
5. Boris Jay P., Book David L. Flax-Corrected Transport, I. SHASTA, a Fluid Transport Algorithm that Works // Journal of Computational Physics. -1973. –Vol.11. –PP. 38-69.
6. Годунов С.К. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1971. - 392 с.
7. Дарьин Н.А., Мажукин В.И. Об одном подходе к построению адаптивных разностных сеток. // ДАН СССР. 1988. Т. 289. – №1. С. 64–68.
8. Дарьин Н.А., Мажукин В.И. Математическое моделирование нестационарных двумерных краевых задач на сетках с динамической адаптацией // Матем. Моделирование. 1989. Т. 1. –№3. С. 29–43.
9. Дарьин Н.А., Мажукин В.И. Метод построения адаптивных сеток для одномерных краевых задач. – М.: ИПМ АН СССР. 1987. 26 с. (Препр. / ИПМ АН СССР; № 33).
10. Мажукин В.И., Самарский А.А., Кастельянос О., Шапранов А.В. Метод динамической адаптации для нестационарных задач с большими градиентами // Матем. Моделирование. 1993. Т. 5, –№ 4. С. 32–56.
11. Бреславский П.В., Мажукин В.И., Такоева Л.Ю. Математическое моделирование лазерного плавления и испарения однородных материалов. Пакет LASTEC-1. -М.: ИПМ АН СССР. 1991. 46 с. (Препр. / ИПМ АН СССР; № 22).
12. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. - 616 с.
13. Liu Y., Shu Chi-Wang, Zhang M. High order finite difference WENO schemes for non-linear degenerate parabolic equations // SIAM J. Scientific Computing, 33(2). 2011. pp. 939-965.

© Д. С. Евстигнеев, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Т. А. Киряева.</i> К оценке энергии газовой составляющей угольного пласта	3
2. <i>Т. А. Киряева.</i> Изменчивость физико-химических свойств угольного пласта как признак его повышенной выбросоопасности	8
3. <i>В. Д. Барышников, В. Г. Качальский.</i> Анализ погрешности определения деформационных свойств образцов кернов при лабораторных испытаниях	13
4. <i>В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, Л. Н. Гахова.</i> К вопросу определения напряжений в соляной толще пород методом параллельных скважин	17
5. <i>С. А. Кондратьев, Д. В. Семьянова.</i> Определение флотационной силы ряда насыщенных жирных кислот	22
6. <i>В. М. Серяков.</i> О напряженном состоянии крепи в условиях применения новоавстрийского способа разработки поперечных сечений выработок	26
7. <i>С. В. Сердюков, М. В. Курленя.</i> Диагностика напряженного состояния массива горных пород методом направленного гидроразрыва	31
8. <i>А. В. Савченко, М. Н. Цупов.</i> Обоснование параметров скважинного дебалансного источника с заполненной жидкостью рабочей камерой	36
9. <i>Л. А. Рыбалкин, А. Н. Дробчик.</i> Разработка вибрационного стенда для изучения влияния упругих колебаний на скорости фильтрации газа	41
10. <i>Е. Ю. Русский, Е. Л. Алферова.</i> Анализ надежности осевых вентиляторов при пожаре в тоннеле метрополитена	45
11. <i>С. А. Кондратьев, В. И. Ростовцев, О. Р. Кулагин, Б. Б. Сиволап.</i> Исследование деформационно-прочностных свойств керновых образцов гранита, обработанных потоком ускоренных электронов	50
12. <i>И. В. Колыхалов, П. А. Мартынюк.</i> Расчет последовательного развития системы поперечных осесимметричных трещин флюидоразрыва пластическим материалом	55
13. <i>А. М. Коврижных, О. М. Усольцева, С. А. Коврижных, П. А. Цой, В. Н. Семенов.</i> Расчет предельных напряжений в слоистых и анизотропных горных породах	60
14. <i>С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, А. В. Морозов.</i> Оценка влияния характеристик режима колебаний рабочего органа на процесс уплотнения сыпучего материала	65

15. <i>Н. В. Ланкевич.</i> Технологии и комплекты оборудования для бестраншейной замены подземных коммуникаций из современных материалов	69
16. <i>В. Н. Лабутин.</i> Экскаватор с поворотным ковшом для безвзрывной выемки полезных ископаемых	73
17. <i>Н. Г. Кю.</i> Оценка распределения напряжений в заданной плоскости по удельным сжимающим усилиям, измеренным по трем направлениям	80
18. <i>О. А. Куликова, И. В. Лугин.</i> Исследование интенсивности процесса теплообмена при движении поезда по протяженному железнодорожному тоннелю в холодный период года	85
19. <i>О. Р. Кулагин, С. А. Кондратьев, В. А. Кузнецов, Р. А. Кулагин, Б. Б. Сиволап.</i> Технология и оборудование для утилизации мелкодисперсной пыли аспирации и газоочистки металлургических предприятий	89
20. <i>А. А. Красновский.</i> Деформирование кусочно-однородных образцов пород с прямоугольной вставкой	94
21. <i>Ю. Н. Шапошник, В. А. Усков.</i> Определение качественной характеристики (RQD) и рейтинга (RMR) рудного массива в подземных выработках шахты «Скалистая»	99
22. <i>В. А. Скрицкий.</i> Выделение метана из краевых частей угольного пласта в процессе его отработки системой ДСО	108
23. <i>Е. П. Русин, С. Б. Стажевский.</i> О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с поэтажным обрушением.....	112
24. <i>Е. П. Русин, Гил Нам Хан.</i> Грунтовые анкеры с гибкой тягой и промежуточной опорой: технология установки, метод расчета	117
25. <i>Е. Ю. Русский.</i> Исследование вибрационной надежности роторов осевых вентиляторов главного проветривания шахт.....	121
26. <i>Е. В. Рубцова, Ю. М. Леконцев.</i> Композитный шахтный анкер с ферромагнитными свойствами.....	126
27. <i>Ю. М. Леконцев, Е. В. Рубцова, А. А. Скулкин.</i> Буровой инструмент и устройства для выполнения измерительных скважин в соляных породах	129
28. <i>В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова.</i> Геомеханическая оценка параметров камерно-целиктовой системы разработки верхней части трубки «Ботубинская»	134
29. <i>А. В. Азаров, А. В. Яблоков.</i> Мониторинг низкочастотных событий при разработке твердых полезных ископаемых	139
30. <i>В. А. Скрицкий.</i> Об эндогенной пожароопасности выемочных участков при высокопроизводительной отработке пологих угольных пластов, склонных к самовозгоранию.....	144

31. <i>Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий.</i> Определение основных параметров системы изменения траектории рабочего органа установки шнекового бурения скважин в грунте	148
32. <i>Л. И. Гендлина, С. Я. Левенсон.</i> К проблеме выпуска связных материалов вибрационным способом	154
33. <i>Л. И. Гендлина, Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев.</i> Результаты исследования влияния характеристик опорных элементов на параметры колебаний вибропитателя	159
34. <i>Л. Н. Гахова.</i> Напряженно-деформированное состояние многослойных железобетонных водоводов при различном сочетании нагрузок	164
35. <i>В. И. Востриков, Н. С. Полотнянко, А. С. Трофимов, А. А. Потака.</i> Измерительный комплекс для контроля геомеханического состояния массивов горных пород	169
36. <i>А. С. Бобыльский, А. В. Резник.</i> Технология разработки бурогольных месторождений с мощными пологопадающими пластами	175
37. <i>Т. В. Шилова.</i> Повышение проводимости трещин гидроразрыва углепородного массива	180
38. <i>В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко, Л. А. Назарова.</i> Теоретические предпосылки ультразвуковой структурной диагностики основной и непосредственной кровли горных выработок в углепородном массиве	185
39. <i>В. Ф. Юшкин.</i> О возможном механизме смещений грунтов борта карьера	189
40. <i>Г. Е. Яковицкая, М. Д. Шаранова, Г. И. Кулаков.</i> Электромагнитное излучение в карьере при отработке угольного целика в поле шахты им. Вахрушева	194
41. <i>И. О. Шахторин.</i> Определение параметров погружного пневмоударника	199
42. <i>Д. В. Зедгенизов.</i> К вопросу учета поршневого действия поездов при автоматическом регулировании частоты вращения ротора тоннельного вентилятора метрополитена	205
43. <i>Г. А. Ефентьев, Ю. И. Николаев.</i> Расчет силовых показателей распорной анкерной крепи из прессованной древесины	210
44. <i>Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко.</i> Статистическая обработка экспериментальных данных по исследованию фильтрационных процессов при низкочастотном виброволновом воздействии в нефтенасыщенном образце	214
45. <i>А. В. Леонтьев, Т. В. Лобанова, Г. Л. Линдин, С. А. Лобанов.</i> Использование результатов геодинамического мониторинга для оценки напряженности шахтных полей	220
46. <i>И. В. Лугин.</i> Исследование воздухораспределения на обобщенной сетевой модели вентиляционной системы метрополитена с однопутным тоннелем	226

47. И. В. Лугин, Е. Л. Алферова. Анализ эффективности вариантов адиабатического увлажнения тоннельного воздуха как способа нормализации микроклимата в сооружениях метрополитена в теплый период года.....	231
48. И. В. Лугин, Е. Л. Алферова. Особенности схем проветривания протяженных железнодорожных тоннелей в суровых климатических условиях.....	237
49. В. Е. Миренков, В. А. Шутов. Метод решения задач для клиновидных областей	241
50. В. Е. Миренков, В. А. Шутов. Численная реализация деформирования областей с угловыми точками	248
51. А. В. Панов, Л. А. Назаров, А. П. Аверин, П. В. Николенко, Л. А. Назарова. Объемное напряженно-деформированное состояние шахты Воркутинская-Заполярная по данным геомеханического моделирования	254
52. А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин. Особенности определения минимальных напряжений методом измерительного гидроразрыва	260
53. Г. И. Пушкарева. Использование низкосортных марганцевых руд Сибири для решения экологических проблем.....	264
54. Б. Б. Данилов, А. И. Чанышев, Д. О. Чецин. Исследование факторов, влияющих на изменение траектории движения грунтового проходчика	268
55. А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, И. В. Фролова. Отыскание источника теплового нагрева в массиве пород по данным измерений температуры и ее градиента на поверхности	273
56. А. И. Чанышев, Г. М. Подыминогин. Предельная нагрузка при косом внедрении клиновидного инструмента в первоначально анизотропную полуплоскость	278
57. В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, Д. И. Кокоулин. Создание системы воздухораспределения погружного пневмоударника для расширенного диапазона рабочего давления	283
58. О. М. Усольцева, В. И. Востриков, П. А. Цой, В. Н. Семенов. Закономерности изменения параметров сигналов микросейсмической эмиссии в зависимости от стадии деформирования при нагружении кубических образцов геоматериалов до разрушения	289
59. О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, Б. Б. Сиволап. Деформационно-прочностные свойства геоматериалов со слоистой структурой при одноосном и объемном сжатии	294
60. А. Я. Хавкин, Т. А. Киряева. Учет нанопор в угле как основа снижения аварийности в шахтах	299
61. М. Н. Цупов, А. В. Савченко. Разработка стенда для исследования воздействия физических полей на систему «уголь – метан».....	303

62. А. И. Чанышев, И. М. Абдулин. Определение зоны пластичности вокруг выработки глубокого залегания по данным измерений смещений на ее поверхности.....	309
63. А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко. Феноменологическая механическая модель геосреды и ее приложения.....	314
64. А. Г. Черников, Е. Н. Шер. Влияние сжатия на распространение сейсмических волн в блочных средах при импульсном нагружении	319
65. Л. А. Кияница, И. В. Лугин. Разработка схемы и обоснование рабочих параметров системы раздельной вентиляции с рециркуляцией станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем.....	324
66. А. В. Леонтьев. Геомеханический мониторинг как элемент горной технологии.....	329
67. Д. С. Евстигнеев. Применение метода адаптивных разностных сеток к задаче двухфазной фильтрации при разработке нефтяных месторождений	336

CONTENTS

1. T. A. Kiryaeva. Evaluation of Gas Component Energy in a Coal Seam	3
2. T. A. Kiryaeva. Variability in Physical and Chemical Characteristics of a Coal Seam as a Higher Outburst Hazard Symptom	8
3. V. D. Baryshnikov, V. G. Kachalsky. Analysis of Error in Laboratory Evaluation of Strain Properties of Core Specimens	13
4. V. D. Baryshnikov, D. V. Baryshnikov, L. N. Gakhova. On Stress Evaluation in Salt Rock Thickness by Parallel Borehole Method	17
5. S. A. Kondratyev, D. V. Sem'yanova. Determination of Flotation Force of a Saturated Fatty Acids Range	22
6. V. M. Seryakov. Stress State of Supports When Using New Australian Process to Advance Cross-Sections of Mine Workings	26
7. S. V. Serdyukov, M. V. Kurlenya. Diagnostics of Stress State of a Rock Mass by the Directed Hydrofracturing Method	31
8. A. V. Savchenko, M. N. Tsupov. Substantiation of the Parameters of the Downhole Unbalanced Source Full of Guns Fluid Working Chamber	36
9. L. A. Rybalkin, A. N. Drobchik. Development of a Vibration Stand to Study the Elastic Oscillation Effect on Gas Filtration Rate	41
10. E. Yu. Russky, E. L. Alferova. Analysis of Axial Fan Durability in Subway Tunnel Fire	45
11. S. A. Kondratiev, V. I. Rostovtsev, O. R. Kulagin, B. B. Sivolap. Investigation into Strain-Strength Properties of Granite Core Specimens Under Accelerated Electron Treatment	50
12. I. V. Kolykhalov, P. A. Martynyuk. Computing Successive Development of Axisymmetrical Transverse Hydrofracture System Under Plastic Material Injection	55
13. A. M. Kovrizhnykh, O. M. Usol'tseva, S. A. Kovrizhnykh, P. A. Tsoi, V. N. Semenov. Computing Limit Stresses in Laminated and Anisotropic Rocks	60
14. S. Ya. Levenson, L. I. Gendlina, A. V. Morozov. Assessment of the Effect of the Actuator Vibration Mode on Consolidation of a Granular Material	65
15. N. V. Lankevich. Technologies and Sets of Equipment for No-Dig Replacing the Underground Services	69
16. V. N. Labutin. Rotable-bucket Excavator for Blast-Free Mineral Mining	73
17. N. G. Kyu. Evaluation of Stress Distribution at a Prescribed Plane Under Specific Compressing Strains Measured at Three Directions	80
18. O. A. Kulikova, I. V. Lugin. Investigation into Heat Exchange Intensity in Freight Train Motion at a Long-Extended Railway Tunnel in Cold Season Period	85

19. O. R. Kulagin, S. A. Kondratiev, V. A. Kuznetsov, R. A. Kulagin, B. B. Sivolap. Process and Equipment to Utilize Finely Dispersed Aspiration and Gas-Cleaning Dust at Smelters	89
20. A. A. Krasnovsky. Deformation of Piecewise-Homogeneous Rock Specimens with a Rectangular Insertion	94
21. Yu. N. Shaposhnik, V. A. Uskov. Definitions Qualitive Characteristic (RQD) and Rating (RMR) ore Mass in the Underground Drive of the Skalisty Mine.....	99
22. V. A. Skritsky. Methane Emission from Coal-Seam Selvage in Longwall Mining with Caving	108
23. E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky. Swedish Version of Sublevel Caving ore Mining System: State-of-the-Art and Prospects	112
24. E. P. Rusin, Guil Nam Khan. Ground Anchors with a Flexible Tendon and an Intermediate Support: Installation Procedure, Engineering Calculation Method	117
25. E. Yu. Russky. Research of Vibration Reliability of Axial Fans Rotors of the Mine Main Airing.....	121
26. E. V. Rubtsova, Yu. M. Lekontsev. Composite Mine Anchor with Ferromagnetic Properties	126
27. Yu. M. Lekontsev, E. V. Rubtsova, A. A. Skulkin. Drilling Tool and a Device to Make Measurement Holes in Salt Rocks	129
28. V. D. Baryshnikov, L. N. Gakhova. Geomechanical Evaluation of Chamber-and-Pillar Mining Parameters for the Upper Section of Botuobinskaya Pipe Deposit	134
29. A. V. Azarov, A. V. Yablokov. Monitoring of Low-Frequency Manifestations in Hard Mineral Mining.....	139
30. V. A. Skritsky. Endogenic Fire Hazard in Heavy Coal-Blocks Mining of Gently Sloping Coal Seams Prone to Spontaneous Combustion.....	144
31. B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky. Determination of Basic Parameters of an Active Member Deviator in Auger Soil Drilling	148
32. L. I. Gendlina, S. Ya. Levenson. Vibratory Technique to Yield Cohesive Materials	154
33. L. I. Gendlina, E. G. Kulikova, V. M. Usol'tsev. Investigation into the Effect of Supporting Element Characteristics on Vibrofeeder Oscillation Parameters	159
34. L. N. Gakhova. The Stress-Strain State of Multi-Layered Concrete Water-Supply Pipelines Under Complex Loads	164
35. V. I. Vostrikov, N. S. Polotnyanko, A. S. Trofimov, A. A. Potaka. Measurement Complex to Control Geomechanical State of Rock Masses	169
36. A. S. Bobyl'sky, A. V. Reznik. Process for Mining of Thick Flat-Dipping Lignite Bedded Deposit.....	175
37. T. V. Shilova. Upsurge of Conductivity of Hydrofractures in a Coal-Rock Mass	180

38. V. L. Shkuratnik, P. V. Nikolenko, L. A. Nazarova. Theoretical Backgrounds for Ultrasonic Diagnostics of Basic and Immediate Roof in Mine Workings in a Coal-Rock Mass	185
39. V. F. Yushkin. Mechanism for Pit Wall Soil Motion	189
40. G. E. Yakovitskaya, M. D. Sharapova, G. I. Kulakov. Electromagnetic Radiation Investigation in Coal Pillar Excavation at Vakhrushev Open Pit Mine.....	194
41. I. O. Shakhtorin. Definition of Parameters Downhole Air Hammer.....	199
42. D. V. Zedgenizov. Correction for Piston-Type Effect of Train Traffic in Automated Rotor Frequency Control of Subway Tunnel Fan.....	205
43. G. A. Efent'ev, Yu. I. Nikolaev. Computing Load-Bearing Characteristics of Expansion-Type Anchor Supports Made of Compressed Wood.....	210
44. D. S. Evstigneev, A. V. Savchenko. Statistical Processing of Experimental Data on Investigation into Filtration Processes Under Low-Frequency Vibration-Wave Effect on an Oil-Saturated Specimen.....	214
45. A. V. Leontiev, T. V. Lobanova, G. L. Lindin, S. A. Lobanov. Using Geodynamic Monitoring Data to Estimate the Stress State of Mine Fields.....	220
46. I. V. Lugin. Generalized Network Model to Study Air Distribution in Subway Ventilation System with One-Track Tunnel.....	226
47. I. V. Lugin, E. L. Alferova. Analysis of Adiabatic Tunnel Air Wetting Efficiency as a Way to Normalize Microclimate in Subway in Warm Season Period	231
48. I. V. Lugin, E. L. Alferova. Specific Aeration Pattern for Extended Railway Tunnels in Severe Climate Environment	237
49. V. E. Mirenkov, V. A. Shutov. Method to Solve the Wedge-Shaped Domain Problems	241
50. V. E. Mirenkov, V. A. Shutov. Numerical Realization of Deformation of Areas Containing Angular Points	248
51. A. V. Panov, L. A. Nazarov, A. P. Averin, P. V. Nikolenko, L. A. Nazarova. Volumetric Stress-Strain State of Vorkutinskaya-Zapolyarnaya Mine Field According to Geomechanical Modeling Data.....	254
52. A. V. Patutin, L. A. Rybalkin. Peculiarities in Minimum Stress Estimation by Measurement Hydrofracturing Method	260
53. G. I. Pushkareva. Utilization of Siberian Poor Manganese Ores to Settle Ecological Problems.....	264
54. B. B. Danilov, A. I. Chanyshchev, D. O. Cheshchin. Study of Factors Affecting Adjustment of a Pneumatic-Punch Penetration Path in Soil	268
55. A. I. Chanyshchev, O. E. Belousova, I. V. Frolova. Identification of a Thermal Heating Source in a Rock Mass from the Data on Temperature and its Gradient Measurements at Rock Mass Surface.....	273
56. A. I. Chanyshchev, G. M. Podymnugin. Ultimate Load at Angular Penetration of a Wedge-Shaped Tool Into Initially Anisotropic Semi-Plane.....	278

57. V. V. Timonin, S. E. Alekseev, D. I. Kokoulin. The Air-Distribution System in Downhole Air Hammer with Expanded Operating Pressure Range	283
58. O. M. Usol'tseva, V. I. Vostrikov, P. A. Tsoi, V. N. Semenov. Regularities in Variations Of Microseismic Emission Signal Parameters According to Deformation Stage in Loading of Cubic Specimens of Geomaterialsup to Failure	289
59. O. M. Usol'tseva, P. A. Tsoi, V. N. Semenov, B. B. Sivolap. Strain-Strength Properties of Laminated-Structure Geomaterials Under Uniaxial and Bulk Compression	294
60. A. Ya. Khavkin, T. A. Kiryaeva. Accounting Coal Nanopore as a Basis for Reducing the Number of Accidents in Mines.....	299
61. M. N. Tsupov, A. V. Savchenko. Test Bench to Study Physical Field Effects on Coal-Methane System.....	303
62. A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin. Evaluation of Plasticity Zone Around a Deep Mine Working from Shear Measurements Made at Its Surface.....	309
63. A. I. Chanyshev, O. E. Belousova, O. A. Luk'yashko. Phenomenological Geomedium Model and Its Applications	314
64. A. G. Chernikov, E. N. Sher. Compression Effect on Seismic Wave Propagation in Block Media Under Pulsed Load	319
65. L. A. Kiyanita, I. V. Lugin. Individual Ventilation System Diagram and Justification of Operation Parameters of the Air Recirculation System for Closed-Type Subway Stations ith Two-Track Tunnel	324
66. A. V. Leontiev. Geomechanical Monitoring as a Component of Mining Technology	329
67. D. S. Evstigneev. Application of Adaptive Difference Grid to Two-Phase Filtration Problem in Oil-Field Development.....	336

Научное издание

XIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *К. В. Ионко*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 15.05.2017. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 20,40. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 8.