

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

X Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

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

Т. 4

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2014

Ответственные за выпуск:

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

Доктор геолого-минералогических наук, академик,
председатель Президиума Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово
А. Э. Конторович

Академик РАН, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
М. В. Курленя

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

Руководитель Регионального агентства по недропользованию
по Сибирскому федеральному округу, Новосибирск
А. И. Неволько

Профессор, проректор по научной
и инновационной деятельности СГГА, Новосибирск
В. А. Середович

Кандидат геолого-минералогических наук,
учёный секретарь ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск
С. П. Зайцев

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. Т. 4. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 275 с.

ISBN 978-5-87693-709-4 (т. 4)

ISBN 978-5-87693-698-1

ISBN 978-5-87693-697-4

В сборнике опубликованы материалы X Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014», представленные на Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-87693-709-4 (т. 4)

ISBN 978-5-87693-698-1

ISBN 978-5-87693-697-4

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ ПОДАВЛЕНИЯ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Рымгали Кумашевич Камаров

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел. (8-7212)56-26-19, e-mail: ipk@kstu.kz

Асель Кенжибековна Турсунбаева

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел. (8-7212)56-26-19, e-mail: a.tursunbaeva75@mail.ru

Жанат Зекеновна Толеубекова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (8-7212)56-26-27, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Аслан Имангалиевич Раскельдинов

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистр кафедры маркшейдерского дела и геодезии, e-mail: asik_744562@mail.ru

Рассмотрены параметры технологии подавления серосодержащих газов с использованием физико-химических методов воздействия на ядовитые газы при ведении подземных горных работ. Установлены параметры разработанных технологий, области их применения.

Ключевые слова: серосодержащие газы, сероводород, сернистый газ, технология, газоносность, газовыделение, раствор.

PARAMETERS OF SULFUR GAS SUPPRESSION USING PHYSICOCHEMICAL METHODS

Rymgali K. Kamarov

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, Ph. D. Eng, Professor, Chair of Mineral Mining, Head of the Center for New Training Methods and Technologies, tel. (7212)56-26-19, fax: (7212)56-54-43, e-mail: ipk@kstu.kz

Asel K. Tursunbaeva

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, Ph. D. Eng, Professor, Chair of Mineral Mining, tel. (7212)56-26-19, e-mail: a.tursunbaeva75@mail.ru

Janat Z. Toleubekova

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, Ph. D. Eng, Assistant Professor, Chair of Surveying and Geodesy, tel. (7212)56-26-27; e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Aslan I. Raskeldinov

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, MS, Chair of Survey and Geodesy, e-mail: asik_744562@mail.ru

The article discusses physicochemical suppression of toxic sulfur gases during underground mining. Parameters of the developed sulfur gas suppression technologies and their application ranges are defined.

Key words: sulfur gases, hydrogen sulfide, sulfur dioxide, technology, gas content, gas release, solution.

В угольных шахтах главными вредными примесями воздуха являются метан, ядовитые и взрывчатые газы (окись углерода, сероводород, сернистый газ, газы взрывчатых веществ и др.). В Карагандинском бассейне выделение серосодержащих газов наблюдалось на шахтах им. В. И. Ленина, «Молодежная», «Казахстанская», «Степная», «Шахтинская», «Тентекская», им. М. И. Калинина, «Чурубай-Нуринская», «Абайская», им. Т. Кузембаева. В настоящее время в бассейне отмечены так называемые сероводородные зоны, приуроченные к пласту д₆долинской свиты и к пластам К₁₆, К₁₂, К₁₀ карагандинской свиты. Одновременно с сероводородом зафиксировано выделение сернистого газа [1].

Известно, что при концентрации сероводорода более 0,0071% по объему, т.е. при 10-кратном превышении допустимых норм, одновременно может выделяться сернистый газ. При одновременном присутствии в воздухе сероводорода и сернистого газа токсичность сероводорода в смеси значительно выше, чем в чистом виде. Привыкнуть к воздействию сероводорода организм не может, наоборот, чувствительность его после перенесенных легких отравлений повышается даже при малых концентрациях, отравление наступает быстрее.

В основном, случаи проявления серосодержащих газов в Карагандинском бассейне наблюдаются до глубины горных работ не более 220...250 м. Однако имели место случаи на шахтах «Молодежная» и «Казахстанская», когда содержание этих газов в пласте отмечалось на глубине 320 и 476 м соответственно. Обычно серосодержащие газы встречаются в пласте в виде «гнезд» с размерами в плоскости пласта от 150 до 600 м.

Без применения специальных мер борьбы с газовыделением содержание ядовитых газов при отработке угольных месторождений может превышать допустимые по ПБ концентрации в десятки и более раз, что оказывает острое токсическое воздействие на организм человека, снижает производительность труда, ухудшает безопасность ведения горных работ, вызывая в отдельных случаях необходимость в остановке добычи угля.

Параметрами технологии подавления серосодержащих газов в рабочих зонах отбойки и транспортирования угля являются производительность оросительных систем, расход реагентов и раствора и др., значительно влияющие на эффективность нейтрализации сероводорода и сернистого газа. Для комплексно-механизированной очистной выемки пласта д₆ эти параметры устанавливаются применительно к горнотехническим условиям шахты «Казахстанская» ПО «Карагандауголь».

Производительность комбайна в сероводородной зоне определяется по скорости подачи и надежности технологических процессов.

Предварительно находится расход воздуха Q_B для проветривания призабойного пространства для случая, когда нагрузка на лаву лимитируется газовым фактором (метаном):

$$Q_B = 60 \cdot v_{\max} S_{o.з}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где $v_{\max}$ — максимальная по ПБ скорость движения по лаве, равная 4 м/с [2];

$S_{o.з}$ — сечение очистной выработки; для комплекса МК-75 при $m_{пл} = 2,2$ м $S_{o.з} = 3,9 \text{ м}^2$.

Следовательно, $Q_B = 60 \cdot 4 \cdot 3,9 = 936 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Так как на шахте «Казахстанская» метанообильность не сдерживает нагрузку на лаву, расход воздуха определяем также по минимально допустимой по пылевому фактору скорости воздуха ($v_{\min} = 0,9 \text{ м/с}$):

$$Q_B = 60 \cdot 0,9 \cdot 3,9 = 210 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

При оптимальной скорости движения струи ($v_{\text{опт}} = 1,6 \text{ м/с}$) расход воздуха составит: $Q_B = 60 \cdot 1,6 \cdot 3,9 = 375 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Для малогазовых очистных забоев шахты «Казахстанская» характерны минимальные расходы воздуха ($Q_B = 210 \text{ м}^3/\text{мин}$), однако в дальнейших расчетах при выборе альтернативных путей снижения концентрации сероводорода и повышения нагрузки на забой будут учтены все три значения.

В сероводородной зоне лимитирующим фактором является не метан, а концентрация сероводорода. По выделению сероводорода требуемое количество воздуха может быть найдено по формуле

$$Q_B = \frac{100I_{np}}{C - C_o}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2)$$

где I — максимальное (абсолютное) выделение сероводорода из призабойного пространства, $\text{м}^3/\text{мин}$; C — предельно допустимая концентрация газа (ПДК) в исходящей вентиляционной струе, $C = 0,00066 \%$ по объему; C_o — концентрация газа в поступающей струе, $C_o = 0$.

В отличие от метана выделение сероводорода в забое происходит не самопроизвольно, а при выемке и измельчении угля, т. е. в конкретные периоды времени, связанные с работой очистной машины или конвейера. Но так как основной объем H_2S выделяется именно при работе выемочной машины, концентрация сероводорода в зоне работы комбайна и определяет количество воздуха, требуемое для разбавления его до санитарной нормы. Поэтому формула (2) может быть представлена в виде

$$Q_B = \frac{q_{o.з} Q_{теор}}{C} 100, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (3)$$

где $q_{0.3}$ — относительная газообильность (по H_2S) очистной выработки, $м^3/т$; $Q_{теор}$ — теоретическая производительность комбайна по данному пласту, $т/мин$; C — санитарная норма (ПДК = 0,00066 %) по сероводороду, %.

При известных значениях расхода воздуха Q_v формула (3) позволяет найти допустимую по сероводороду производительность комбайна в лаве и соответственно допустимую скорость подачи машины:

$$Q_{теор} = \frac{Q_v C}{100 q_{0.3}}, \text{ т/мин.} \quad (4)$$

В формуле (4) известную трудность представляет установление величины $q_{0.3}$ по H_2S . В работе И.П. Складенко, изданной в 1958 г. и являющейся более или менее систематизированным трудом по сероводороду, максимальная газоносность угля в пробе, подогретой до $100^\circ C$, составила 5 - 6 $см^3$ на 100 г угля, т. е. 0,05 - 0,06 $м^3/т$ [3]. Максимальная газоносность углей в Карагандинском бассейне зафиксирована на шахте «Казахстанская» по верхнему слою пласта d_6 (0,36 - 0,41 $м^3/т$, с подогревом пробы) и на шахте им. В.И. Ленина по нижнему слою пласта d_6 (0,20 - 0,23 $м^3/т$, тоже с подогревом) [4, 5, 6]. Отметим, что без подогрева пробы установить газоносность углей по H_2S невозможно. Такое содержание сероводорода в угле следует считать аномально высоким. Однако среднее значение газоносности по 70 пробам 5 шахт составило 0,07 $м^3/т$ с подогревом и 0,00062 $м^3/т$ — без подогрева. Таким образом, в горные выработки без подогрева угля выделяется незначительная часть сероводорода, составляющая в среднем по 70 пробам 0,88 % от общей газоносности по H_2S . Следовательно, в первом приближении для шахт Карагандинского бассейна можно принять $q_{0.3} = 0,00062 \text{ м}^3/т$.

Однако не следует игнорировать и тот факт, что пласт d_6 на восточном крыле шахты «Казахстанская» и им. В.И. Ленина проявляет себя как уникальный объект с аномально высоким содержанием сероводорода. Поэтому для этих шахт целесообразно установить «свои» значения $q_{0.3}$. Среднее значение газоносности по 16 пробам шахты «Казахстанская» составило 0,1845 $м^3/т$, среднее газовыделение (без подогрева) составило 0,00147 $м^3/т$, т. е. 0,80 % от общей газоносности. Следовательно, в среднем $q_{0.3} = 0,00147 \text{ м}^3/т$ (по H_2S), тогда как максимум $q_{0.3} = 0,011 \text{ м}^3/т$. Таким образом, можно ожидать восьмикратное превышение уровня выделения сероводорода по лаве относительно среднего значения $q_{0.3}$.

По шахте им. В.И. Ленина среднее значение газоносности по 35 пробам равно 0,0428 $м^3/т$, среднее газовыделение (естественное, без (подогрева) — 0,000486 $м^3/т$ (1,14 %), значит, в среднем $q_{0.3} = 0,000472 \text{ м}^3/т$ (по H_2S), тогда как максимум $q_{0.3} = 0,0053 \text{ м}^3/т$. Итак, можно ожидать двенадцатикратное превышение уровня выделения сероводорода по лаве относительно среднего значения $q_{0.3}$.

Аналогичные показатели по остальным шахтам представлены в табл. 1 и в дальнейшем будут использованы как исходные данные для расчетов.

Таблица 1

Газоносность и газовыделение по шахтам, м³/т

Шахта, пласт	Количество проб	Газоносность пласта		Газовыделение	
		$q_{\text{пл}}^{\text{max}}$	$q_{\text{пл}}^{\text{ср}}$	$q_{0.3}^{\text{max}}$	$q_{0.3}^{\text{ср}}$
«Степная», д ₆	11	0,0838	0,0263	0	0
Им. М.И. Калинина, К ₁₀	6	0,0230	0,0107	0	0
«Молодежная», д ₆	2*	0,0563	0,0346	0,0015	0,0008
Им. В.И. Ленина, д ₆	36	0,2250	0,0428	0,0053	0,00049
«Казахстанская», д ₆	16	0,4067	0,1845	0,0109	0,00147
Среднее	70	-	0,07	-	0,00062

* Пробы взяты из подготовительных забоев, остальные — из очистных.

Из табл. 1 следует, что среднее для группы шахт газовыделение (H₂S) из очистного забоя составляет $q_{0.3} = 0,00062 \text{ м}^3/\text{т}$, или 0,88 % от газоносности. Подставляя в формулу (5.5) численные значения $q_{0.3}$ и C, а также ожидаемый диапазон значений теоретической производительности комбайна $Q_{\text{теор}}$, имеем

$$Q_{0.3} = \frac{q_{0.3} Q_{\text{теор}}}{C} \cdot 100 = \frac{0,00062(1+8)}{0,00066} \cdot 100 = 846 \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (5)$$

Анализ соотношения величин, входящих в формулу (5), приводит к важным выводам:

1. При постоянной величине расхода воздуха для проветривания очистного забоя ($Q_{0.3} = \text{const}$) уровень загазованности лавы по сероводороду зависит на 50 % от относительной газообильности $q_{0.3}$ по H₂S и на 50 % от минутной производительности работающего комбайна $Q_{\text{теор}}$. Параметры $q_{0.3}$ и $Q_{\text{теор}}$ можно назвать режимными, так как они позволяют регулировать режим добычи угля в сероводородной зоне и санитарно-гигиенические условия труда.

2. При средней для группы шахт газообильности $q_{0.3} = 0,00062 \text{ м}^3/\text{мин}$ и минимальном расходе воздуха $Q_{\text{в}} = 210 \text{ м}^3/\text{мин}$ производительность комбайна до 1,98 т/мин обеспечивает нормальные санитарные условия в лаве по сероводороду (до 1 нормы).

3. При средней для шахты «Казахстанская» газообильности по H₂S, равной 0,00147 м³/т по пласту д₆, и минимальном значении $Q_{\text{в}} = 210 \text{ м}^3/\text{мин}$ санитарная норма по H₂S обеспечивается при работе комбайна с производительностью не более 0,94 т/мин.

Согласно «Руководству по борьбе с пылью в угольных шахтах», число форсунок в оросительной системе должно быть таким, чтобы их суммарная производительность при требуемом давлении воды была равна расчетному расходу воды, определяемому из выражения

$$Q = Aq, \text{ л/мин}, \quad (6)$$

где Q — расчетный расход воды, л/мин; A — производительность горной машины, т/мин; q — удельный расход воды, л/т (орошение при работе выемочных и проходческих комбайнов $q = 30 - 40$ л/т).

Форсунки должны быть расположены так, чтобы жидкое химическое вещество направлялось преимущественно в места разрушения горного массива (во вруб, на резцы комбайна).

Технология приготовления жидкого химического вещества заключается в следующем: определенное количество сорбирующего реагента (глицерина, триэтиленгликоля) тщательно разводят водой в водяном баке емкостью $1,5 - 2,0 \text{ м}^3$ установленном у насоса для подачи воды к форсункам комбайна, т. е. используют имеющуюся в лаве типовую оросительную систему.

Во время работы комбайна приготовленный раствор подается на форсунки, установленные на комбайне. При распылении раствора в атмосфере выработки, и особенно в зоне работы режущих органов комбайна, наряду с подавлением угольной пыли происходит контактирование серосодержащих газов с раствором сорбента, результатом которого является полная адсорбция серосодержащих газов.

При технологии подавления серосодержащих газов на основе глицерина количество раствора берут из расчета 88 мл ($\gamma = 1,261 \text{ г/см}^3$) реагента на 1 л воды. При таком соотношении глицерина и воды получается $10 \text{ \%}$ -й раствор глицерина. Для приготовления $5 \text{ \%}$ -го раствора берут 44 мл ($\gamma = 1,01 \text{ г/см}^3$) глицерина на 1 л воды.

Для более полного поглощения газов $5 \text{ \%}$ -й раствор глицерина используется в тех случаях, если концентрация серосодержащих газов в рудничной атмосфере ниже 50 норм, т. е. ниже 500 мг/м^3 , а $10 \text{ \%}$ -й раствор — при содержании выше 50 норм.

Состав с нижним пределом глицерина ($0,5 \text{ \%}$) и гидроксида щелочного металла ($0,1 \text{ \%}$) рекомендуется при концентрации серосодержащих газов в рудничной атмосфере до 100 санитарных норм, со средним пределом $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ($1,5 \text{ \%}$) и NaOH или KOH ($0,2 \text{ \%}$) — при содержании серосодержащих газов в рудничной атмосфере от 100 до 150 норм, с верхним пределом глицерина ($3,0 \text{ \%}$) и гидроксида щелочного металла ($0,2 \text{ \%}$) — при очистке шахтной атмосферы с исходной концентрацией серосодержащих газов 150 норм и более.

В случае применения технологии подавления вредных газов с помощью гидроксидно-глицеринового состава используют имеющуюся в лаве ТОС. При этом количество раствора берут из расчета $4,2 \text{ г}$ глицерина, $1,0 \text{ г}$ гидроксида калия или натрия на 1 л воды. При таком соотношении глицерина, гидроксида калия или натрия и воды получают $0,5 \text{ \%}$ -й $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$; $0,1 \text{ \%}$ -й KOH или NaOH . Для приготовления $1 \text{ \%}$ -го $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ берут $8,8 \text{ г}$ глицерина; $0,2 \text{ \%}$ -го KOH или NaOH — 2 г гидроксида калия или натрия на 1 л раствора. Аналогично готовится раствор с $0,3 \text{ \%}$ -м глицерином и $0,2 \text{ \%}$ -м гидроксидом калия или натрия.

В процессе работы комбайна гидроксидно-глицериновый раствор подают на форсунки. Распыление раствора в зоне работ комбайна обеспечивает подавление серосодержащих газов. В присутствии глицерина небольшое содержание

гидроксида калия или натрия не проявляет раздражающего действия на организм человека.

Расход раствора зависит от концентрации и количества серосодержащих газов, выделившихся в атмосферу горной выработки. Состав можно использовать для предварительной обработки угольного массива в зонах проявления серосодержащих газов посредством бурения глубоких скважин и нагнетания в них предлагаемого состава.

Технология подавления газов на гидроксидно-триэтиленгликолевой основе отличается от приведенных выше лишь составом реагентов. Для более полного поглощения и нейтрализации газов 0,5 %-й раствор триэтиленгликоля и 0,1 %-й раствор гидрата окиси щелочных металлов берется в тех случаях, когда концентрация сероводорода в рудничной атмосфере ниже 1500 мг/м^3 , а 1,0 %-й раствор триэтиленгликоля и 0,2 %-й раствор гидрата окиси щелочных металлов — при содержании сероводорода более 1500 мг/м^3 . Концентрацию раствора устанавливают из расчета 8,2 г триэтиленгликоля, 2 г гидрата окиси калия или натрия на 1 л воды. При таком соотношении получают 1,0 %-й триэтиленгликоль, 0,2 %-й гидрат окиси щелочных металлов. Для приготовления 0,5 %-го триэтиленгликоля берут 4,1 г Н (ОСН₂СН₂)₃ОН, а 0,1 %-го гидрата окиси щелочных металлов — 1 г КОН или NaOH на 1 л раствора.

Сравнительный анализ гидроксидно-глицериновой и гидроксидно-триэтиленгликолевой технологий позволяет судить о достаточно высокой их эффективности нейтрализации серосодержащих газов. Вместе с тем область их применения отличается и зависит от интенсивности газовыделений. Как при глицериновом, так и при триэтиленгликолевом составе (по данным шахтных и лабораторных исследований) и концентрации сероводорода до 1000 мг/м^3 поглощательная способность растворов высокая. При 0,5 % глицерина и той же концентрации триэтиленгликоля сероводород сорбируется практически полностью. Поглощательная способность сравниваемых растворов отличается при нейтрализации сероводорода с его концентрацией свыше 1000 мг/м^3 . При изменении состава глицерина от 0,1 до 0,5 % и концентрации сероводорода в шахтной атмосфере $1000 - 1500 \text{ мг/м}^3$ содержание газа снижается от 10 мг/м^3 до 0. При той же концентрации газа и содержании триэтиленгликоля 0,5 - 1,0 % практически полностью поглощается сероводород. Аналогично при концентрации Н₂Ссвыше 1500 мг/м^3 [1].

Глицериновый и триэтиленгликолевый состав можно использовать для предварительной обработки газоносных горных пород, содержащих сероводород, посредством бурения глубоких скважин и нагнетания в них предлагаемого состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физико-химические воздействия на серосодержащие газы при ведении подземных горных работ: Монография / Н.А. Дрижд, Р.К. Камаров, Т.К. Исабек, В.С. Портнов. — Караганда: Изд-во КарГТУ, 2013. — 186 с.
2. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. — М.: Недра, 1973. — 512 с.

3. Складенко И.П. Сероводород в угольных шахтах и меры борьбы с ним. – М.: Углетехиздат, 1958. – 30 с.
4. Кривошеев В.О., Негруцауя Н.С., Преображенская Е.И. Способы борьбы с серосодержащими газами на шахтах Карагандинского бассейна: Эффективные способы дегазации угольных шахт // Труды ВостНИИ. – Кемерово: 1978. Т. 30. – С. 79 – 86.
5. Разработать способы и провести шахтные наблюдения эффективности способов снижения серосодержащих газов, выделяющихся в атмосферу горных выработок. – Караганда: КО ВостНИИ, 1978. – 167 с.
6. Рекомендации по борьбе с серосодержащими газами на угольных шахтах. – Караганда: КарПТИ, 1983. – 18 с.

© Р. К. Камаров, А. К. Турсунбаев, Ж. З. Толеубекова, А. И. Раскельдинов, 2014

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕНТГЕНОРА-ДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РУДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ШАХТ ПО «ЖЕЗКАЗГАНЦВЕТМЕТ»

Сергей Анатольевич Ефименко

ТОО «Корпорация Казахмыс», 101300, Республика Казахстан, г. Сатпаев, Карагандинская область, ул. Абая, 42, кв. 60, кандидат технических наук, главный геофизик, тел. (8-71063)33950, факс: (8-71063)22276, e-mail: serqyef@Mail.ru

Ольга Сергеевна Ефименко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, студентка кафедры «Интегрирование технологии машиностроения», e-mail: olqa.91.06@yandex.ru

Василий Сергеевич Портнов

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики, тел. (8-7212)56-78-62, e-mail: vs_portnov@mail.ru

Рымгали Кумашевич Камаров

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел. (8-7212)56-26-19, факс: (8-7212) 56-54-43, e-mail: ipk@kstu.kz

Жанат Зекеновна Толеубекова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, заместитель директора по научной работе Горного института, тел. (8-7212)56-26-27, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Габдулганур Каиргельдыулы Макишев

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистр, кафедры маркшейдерского дела и геодезии, e-mail: garurmake6@bk.ru

Статья посвящена принципам построения информационных баз для комплексной многофункциональной системы рудоподготовки (КМСРП) и подсистемы управления качеством добываемых руд и металлов (СУКДРиМ) модульного типа для рудников подземной добычи ПО «Жезказганцветмет» - филиала ТОО «Корпорация Казахмыс», стержнем которых является рентгенорадиометрический метод опробования и анализа руд. Предложена структура многофункциональной рентгенорадиометрической системы рудоподготовки. Даны рекомендации по выбору современной ядерно-геофизической аппаратуры.

Ключевые слова: многофункциональная система, рудоподготовка, подземная добыча, руда, метод, анализ, рудник.

ABOUT POSSIBILITY OF MULTIFUNCTIONAL X-RAY-DIOMETRICAL SYSTEM FOR PREPARATION USAGE ON THE MINES OF JSC «ZHEZKAZGANCVETMET»

Sergey A. Efimenko

JSC «Kazakhmys Corporation», 101300, Republic of Kazakhstan, Satpaev, Karaganda region, Abay st. 42, ap. 60, candidate of technical sciences, main geophysist, tel. (8-71063)33950, fax: (8-71063)22276, e-mail: serq yef@mail.ru

Olga S. Efimenko

National Technical University «CharkovPolitechnical University», 61002, Ukraine, Charkov, Frunze st. 21, student of «Machine building technologies integration Department», e-mail: olqa91.06@yandex.ru

Vasiliy S. Portnov

Karaganda State Technical University, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, Ph.D., Professor of «Geophysics Department», tel. (8-7212)56-78-62, e-mail: vs_portnov@mail.ru

Rymgali K. Kamarov

Karaganda State Technical University, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, Candidate of technical sciences, professor of Mining Department, Head of centre of new methods and technologies of education of KSTU, tel. (8-7212)56-26-19, fax: (8-7212)56-54-43, e-mail: ipk@kstu.kz

Janat Z. Toleubekova

Karaganda state technical university, Kazakhstan Republic, 100027, Karaganda, 56 Mira Blvd, assistant professor of «Mine survey and geodesy» department, Ph. D., Vice Director for Research of the Mining Institute, tel. (7212)56-26-27, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Gabdulgapur K. Makishev

Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, M.S. in Geodesy of Cartography, «Mine survey and geodesy» department, e-mail: gapur-make6@bk.ru

Article describes main principles of information base construction for multifunctional system of ore preparation (CMSOP) and system of mined ore and metals quality management (SMOMQM) and module type for the mines of “ZhezkazganCvetmet” – branch of JSC “Kazakhmys Corporation”, base of which is x-ray-radiometrical method of ore analysis. Structure of multifunctional x-ray-radiometrical system of ore preparation is proposed. Recommendations of modern nuclear-geophysical equipment choose are given.

Key words: multifunctional system, ore preparation, underground mining, ore, method, analysis, mine.

Ввиду большой протяжённости и разной глубины залегания рудных тел, Жезказганское месторождение отрабатывается как подземным, так и открытым способами. Вскрытие рудных тел, отрабатываемых подземным способом, производилось вертикальными стволами и квершлагами. Отработка осуществляется в нисходящей последовательности, в основном камерно-столбовой системой с последующим погашением выработанного пространства путём выемки междукammerных целиков, частично (на участках, представленных флексурными за-

лежами) – системой подэтажного обрушения. Исходя из раскройки шахтных полей по площади и глубине разработки в составе каждого рудника выделены по несколько производственных единиц – шахт и карьеров. На всех технологических процессах вскрытия, подготовки и отработки рудных залежей используется высокопроизводительное самоходное оборудование: буровые каретки Boomer 2MD, SandvikDD 420 – 60, SandvikDD 410 – 40, SimbaM7C; дизельные автосамосвалы MT 5020, TORO – 50+, CaterpillarAD 20; ковшевые погрузчики Caterpillar 980 HUMA, SandvikLH514, ST 1520; крепильщики кровли SandvikDS – 510 (Робоболт), BoltecLD; оборщик кровли Caterpillar 980 H OKHT.

Если раньше максимальной экономической эффективности от отработки многокомпонентных месторождений старались достичь за счет интенсификации процессов добычных работ (при этом, каждое предприятие разведывало и эксплуатировало только свое «полезное ископаемое»), то сейчас – за счет мероприятий по оптимизации уровня комплексности использования георесурсов.

Для подземных рудников Жезказгана наилучшим образом подходит концепция технического перевооружения в рамках диверсификации горного производства, предложенная Г.Г. Ломоносовым [1]. Согласно этой концепции на рудники наряду с добычей руды возлагаются функции первичной рудоподготовки, путем выполнения совокупности разделительных (сепарационных) и смесительных (усреднительных) процессов, что позволит повысить их конкурентоспособность на рынке минеральных ресурсов. Похожая концепция была реализована на шведском руднике «Кируна» [2]. При такой постановке вопроса, от того, как быстро, в какой форме, с какой степенью достоверности, и в каком объеме будет поступать информация о качестве руды, во многом будет зависеть эффективность как комплексной многофункциональной системы рудоподготовки, так и системы управления качеством добываемых руд и металлов – важных составляющих новой концепции.

Предметом настоящей работы является не вся система технического перевооружения, а некоторые фрагменты комплексной многофункциональной системы рудоподготовки, а также системы управления качеством добываемых руд и металлов, практическая реализация которых может принести существенную экономическую выгоду при относительно небольших затратах.

Определение содержания элементов в руде – задача рудничного опробования, которое всегда являлось самым «узким» звеном в системе управления качеством добываемых руд и металлов любой конфигурации. Сделать рудничное опробование соответствующим уровню комплексной многофункциональной системы рудоподготовки и системы управления качеством добываемых руд и металлов нового поколения – значит решить очень важную и сложную научную и производственную задачу.

Если говорить о Жезказгане, то ситуацию с шахтным опробованием осложняют три вещи: во-первых, большая (до 8м) высота очистных забоев и уступов (их необходимо опробовать вкрест простирания рудных тел, то есть вертикальными сечениями); во-вторых, необходимость получения достоверной

информации о содержаниях всех основных промышленных (Cu, Zn, Pb) и сопутствующих (Ag, Cd, Re, S) промышленных элементов (чтобы организовать эффективное планирование и контроль за добычей всех промышленных элементов с целью получения максимальной прибыли от переработки руды); в-третьих, огромные объемы опробования, которые надо обеспечить с минимально возможными временными и экономическими затратами.

Понятно, что в таких условиях обеспечить точное и представительное опробование традиционными геологическими методами (отбор проб, химический анализ) невозможно – нужны современные, высокопроизводительные и экономически привлекательные технологии опробования руд. Такие, как ядерно-геофизические технологии опробования руд (ЯГФТОР), например.

Из всего многообразия современных ЯГФТОР поставленным задачам в наибольшей степени отвечает рентгенорадиометрический метод (РРМ) опробования забоев. Хотя РРМ является малоглубинным (пленочным) методом, теоретическими исследованиями, многочисленными экспериментами на горных предприятиях цветной металлургии Казахстана, было убедительно доказано, что выбором оптимальной сети опробования и его периодичности, работой только не запыленных забоях, скважинах и навалах руды, можно достичь достоверности и представительности данных рентгенорадиометрического опробования вполне достаточной для решения задач в рамках технологии подземной добычи руды, контроля за процессами добычи руд и металлов и непосредственного оперативного управления качеством добываемых руд, как по всему списку промышленных рудных компонентов, так и по точности, и достоверности определения содержаний этих элементов.

Таким образом, РРМ опробования руд в условиях естественного залегания (забои), отбитой горной массы (руда в навале у забоя, рудные отвалы), транспортных емкостях (автосамосвалы, вагонетки) – РРО, РРМ анализа истертых забойных, шпуровых, вагонных и керновых проб – РРА и РРМ метод каротажа эксплуатационно – разведочных скважин – РРК, могут рассматриваться не только в качестве основного метода геологического обслуживания горных работ на рудниках подземной добычи ПО «Жезказганцветмет», но и в качестве фактически единственного инструмента формирования информационных блоков подсистем контроля за процессами добычи руд и металлов и непосредственного оперативного управления качеством добываемых руд при проектировании комплексной многофункциональной системы рудоподготовки и системы управления качеств добываемых руд и металлов нового поколения.

Чтобы новая система геологического обслуживания горных работ, базирующаяся на ЯГФТОР, работала эффективно, необходимо аппаратное обеспечение, максимально адаптированное к горно-геологическим условиям месторождения. В части, РРО забоев – это необходимость в одновременном определении содержаний Cu, Zn, Pb (а Cu и Zn – это соседние элементы, их аналитические линии в спектрах перекрываются) и большая высота забоев. В части РРА проб – это необходимость в одновременном определении очень высоких (до 80%) содержаний SiO₂, высоких (до 20%) содержаний Cu, Pb и Zn, низких

(1–100 ppm) содержаний Ag и Cd и очень низких (0,5 – 5,0 ppm) содержаний Re. Кроме этого, Si (а также S и Al) – это легкие элементы, анализ которых методом РРА имеет свою специфику (вакуумный насос или инертный газ, анализ пробы за два раза).

Правильный выбор аппаратуры для опробования и анализа руд определяет уровень самой системы геологического обслуживания горных работ. Поэтому остановимся подробнее на технических характеристиках аппаратуры и на новых возможностях, открывшихся в результате ее применения.

Задача РРО забоев на рудниках подземной добычи ПО «Жезказганцветмет» решается с 1978 года. В настоящее время РРО забоев, уступов, отбитой горной массы в навале, шпуровых проб выполняется с помощью эмиссионного рентгенофлуоресцентного спектрометра (EDXRF) РПП – 12 (рис. 1), выпускаемых ТОО «АспапГео» (г. Алма – Ата, Казахстан): радиоизотопный источник Pu – 238; масса: датчика – 1,0 кг, электронного блока – 0,5 кг; число каналов преобразования – 1024; буфер памяти – 1000 спектров; время измерения – 10 сек; число одновременно определяемых элементов – 4; время работы на Ni – Mn аккумуляторах – 48 ч; комплект штанг (4х1,5м). Сейчас эксплуатации находятся 18 комплектов спектрометров РПП – 12. Можно однозначно утверждать, что РПП – 12 – это единственный прибор, который идеально подходит для шахт Жезказгана. Он удобен в эксплуатации и очень надежен (работоспособность датчика, упавшего с большой высоты, восстанавливается за 48 часов).



А



Б

Рис. 1. Носимый EDXRF спектрометр РПП – 12
(А – РПП – 12, Б – блок обработки информации)

Задача РРА забойных, шпуровых, шламовых, вагонных и керновых проб решается с 1987г. В настоящее время РРА выполняется с помощью лабораторных EDXRF спектрометров РЛП – 21 и РЛП – 21Т (рис. 2), выпускаемых ТОО «АспапГео» (г. Алма – Ата, Казахстан).



а



б

Рис. 2. Лабораторные EDXRF спектрометры РЛП – 21 (*а*) и РЛП –21Т (*б*)

Спектрометр РЛП-21 обеспечивает определение содержаний 34 элементов (Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Fe, As, Ba, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Ga, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, In, Sn, Sb, Ta, Hg, Bi, W, U, Th) в порошковых пробах руд и горных пород. РЛП-21 – это: Si–Li полупроводниковый детектор площадью 100мм² (охлаждение - жидкий азот); изотопные источники америций – 241 (4-6 шт); мишень (Ba или Cs); экспозиция измерений 415 сек; облучение кюветы с пробой – снизу, турель на 10 кювет.

Спектрометр РЛП – 21Т в обычном режиме обеспечивает определение содержаний 31 элементов (Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Mo, Fe, Se, As, Ba, W, Bi, Ti, Cr, Mn, V, Ni, Al, Si, S, Ca, Ga, Br, Sr, Zr, Rb, Y, Nb, Pd, U, Th) в одном режиме без применения вакуумного насоса или инертного газа при анализе на легкие элементы. Диапазон энергий от 1,49 кэВ (AlK α) до 23,0 кэВ (CdK α). EDXRF спектрометр РЛП-21Т – это: дрейфовый полупроводниковый детектор (SDD) площадью около 25 мм² и толщиной 300-500 микрон (охлаждение – термохолодильник Пельтье); рентгеновская трубка VF-50J Rh (50 Вт) фирмы VarianMedicalSystems (США); экспозиция измерений 150 сек; облучение кюветы с пробой – сверху; турель на 9 кювет. Детектор обеспечивает разрешение 150 эВ по линии 5,9 кэВ при загрузке 100 кГц. Мишень из теллура. Время формирования импульса 1,6 мкс. Сигнал полностью оцифровывается. Режим поддержания на постоянном и высоком (90000имп/с) уровне загрузки спектрометрического тракта. По специальному заказу РЛП – 21Т может быть оснащен опцией (PPA на Re). Данная опция позволяет определять 19 элементов: Re, Ge, Cu, Zn, Pb, K, Ca, Ti, Cr, V, Mn, Fe, Co, Ni, As, Se, Ba, S, W при экспозиции измерений 500с.

Спектрометры РЛП – 21 и РЛП – 21Т ведут PPA по универсальной методике, реализующей принцип «месторождения разные, типы руд разные – градуировка спектрометра одна»: спектрометры, проградуированные на стандартных образцах руд (ГСО) месторождений Казахстана, с успехом анализировали не только руды со всех месторождений, разрабатываемых ТОО «Корпорация Казахмыс», но и промышленные продукты Жезказганского медеплавильного завода (отвальный, конверторный и анодный шлаки, гранулы, штейн, оборотную пыль, концентрат с конвертора. Пределы обнаружения (по критерию 3 σ):

Cu – 0,0104% (ГСО-84; аттестованное содержание C(Cu) = 0,11%), Zn – 0,0058% (ГСО-2887; C(Zn) = 0,011%), Pb – 0,0084% (ГСО-2887; C(Pb) = 0,037%), Ag – 0,74 ppm (ГСО-8078; C(Ag) = 1,6 ppm), Cd – 1,05 ppm (ГСО-4322; C(Cd) = 5,0 ppm), Re – 1,12 ppm (ГСО-2887; C(Re) = 1,65 ppm). Для определения более низких концентраций рения РРА на РЛП – 21Т должна предварять методика предварительного концентрирования рения на активированном угле из раствора, полученного после химического разложения пробы. Сейчас в экспресс-лаборатория геологической службы ПО «Жезказганцветмет» работают семь спектрометров РЛП – 21 и РЛП – 21Т.

Каждый забой или уступ, включенный в план добычи руды и металла, в течение месяца, опробуется (порядок РРО забоя показан на рис. 3) от 3 до 7 раз по 1 – 2 сечениям (вертикальным) высотой до 8м с шагом наблюдений 15 ÷ 20 см. Такая технология РРО забоев открывает новые возможности, достичь которых при традиционной технологии геологического обслуживания горнодобычных работ нельзя, а именно:

а) получать достоверную информацию о содержаниях меди, свинца и цинка в разрезе каждого забоя или уступа и объективно судить о динамике изменчивости средних содержаний этих элементов;

б) делать (на базе анализа динамических рядов текущих содержаний меди, свинца и цинка) надежный прогноз содержаний металлов по забоям на следующий месяц;



Рис. 3. Порядок РРО забоя сEDXRF спектрометром РПП – 12

в) своевременно корректировать направление очистных работ для обеспечения ведения последних в режиме минимального разубоживания руды ды породой путем: поднятия почвы забоя; оставления породного козырька в кровле забоя; остановки забоя добычей;

г) оперативно управлять процессом добычи с помощью:

- гибкого перераспределения суточной нагрузки на забои с высоким или более низким качеством руды;

- выведения из добычи забоев с низким качеством руды и введения в добычу резервных забоев с более высоким качеством руды в случае неблагоприятной ситуации с выполнением планового задания по добыче металла;

- выведения из добычи забоев с высоким качеством руды и введения в добычу резервных забоев с более низким качеством руды в случае благоприятной ситуации с выполнением планового задания по добыче металла, чтобы не только гарантировать к концу месяца выполнения шахтой плана по добыче металла, но и как можно дольше поддерживать плановый уровень качества товарной руды за счет разумного сочетания нагрузки на богатые и бедные забои, что в конечном итоге должно положительно отразиться на полноте извлечения запасов из недр;

д) оперативно управлять процессом откатки дизельным автотранспортом:

- руды из забоев и блоков к рудоспускам строго по технологическим сортам (полиметаллическая руда не должна попадать в сорт «медная сульфидная», чтобы не ухудшать качество медного концентрата, а руда «медная сульфидная» – в полиметаллическую, чтобы не перекачивать медь в низкосортные марки медного концентрата);

- породы из забоев в отработанные панели.

Ввод в систему геологического обслуживания горно – добычных работ лабораторных спектрометров РЛП – 21 и РЛП – 21Т позволил многократно увеличить объем информации о содержании в рудах не только всех основных, то и всех сопутствующих промышленных элементов. В результате открылись новые возможности, такие как:

а) переход на фиксацию содержаний серебра (а также Cd и S, при необходимости) в паспортах разведочных скважин по секциям, а не по рудному пересечению в целом, как было до этого (аналогичная ситуация и по геологическим разрезам);

б) представительный учет добычи серебра по данным РРА вагонных проб (полная аналогия с методикой учета добычи меди), это позволило отказаться от методики учета добычи серебра по данным химического анализа объединенных декадных и месячных вагонных проб, обеспечив тем самым более объективное распределение серебра между рудниками, шахтами и карьерами, в том числе и за счет исключения ошибок при формировании объединенных проб;

в) повышение полноты извлечения металлов из недр за счет методики остановки добычей забоев, вышедших за контур балансовых руд: забой, с некондиционным (по данным РРО) содержанием меди, опробуется пунктирно - бо-

роздовым способом и выводится из добычи, если содержание серебра в нем (по данным РРА проб) окажется ниже планового содержания по шахте (в противном случае, забой остается в добыче);

г) проверка данных вагонного опробования ОТК на фальсификацию (для этих целей используются массивы динамических рядов содержаний основных и сопутствующих рудных компонентов в руде, отгруженной из капитальных рудоспусков): вес данные вагонного опробования ОТК проходят компьютерную обработку по следующей схеме: массив данных вагонного опробования по шахте разбивается на подмассивы (по рудоспускам); подмассивы (по рудоспускам) добавляются к имеющимся массивам данных по тем же рудоспускам и проверяются на однородность (по содержаниям Cu и Ag); данные вагонного опробования, не прошедшие проверку на однородность одновременно по содержаниям Cu и Ag, бракуются, так как ряд данных вагонного опробования (заведомо ошибочных) может пройти проверку на однородность по содержанию Cu, но вероятность того, что они пройдут проверку на однородность еще и по Ag, ничтожно мала;

д) наличие более полной, достоверной и оперативно обновляющейся информационно-базы о содержаниях Cu, Pb, Zn, Ag и Cd в рудопотоках, забойных, шпуровых, шламовых и керновых пробах дает основу для формирования базы данных по изучению особенностей пространственного распределения этих элементов в плане и разрезах рудных залежей, на которые можно опереться при отработке, как этих, так и других залежей рудного горизонта;

е) формирование баз данных о содержаниях Cu, Pb, Zn, Ag и Cd для геологических разрезов по горноподготовительным выработкам, проходку которых осуществляет Жезказганскийшахтопроходческий трест, чтобы использовать эти базы для целей текущего планирования добычи руд в будущем.

Переход на систему управления качеством добываемых руд на содержание Ag и Cd по результатам РРА проб на спектрометрах РЛП – 21 и РЛП – 21Т позволит: достичь более высокой достоверности учета добытого Ag и Cd; организовать оперативный и эффективный контроль за добычей Ag и Cd по сменам, суткам, рудоспускам, шахтам и карьерам; получать достоверные данные о приросте запасов этих металлов при доразведке месторождения и регулярно пополнять банки данных о характере пространственного размещения Ag и Cd в рудных залежах; объективно производить списание запасов Ag и Cd; вовлечь в добычу забалансовые запасы медных руд с содержанием Ag и Cd выше среднего по шахте.

В рамках работы над концепцией технического перевооружения подземных рудников Жезказгана ЯГФТОР были использованы при проведении исследований по изучению усреднительных характеристик капитальных рудоспусков, являющихся важным элементом стабилизации качества руды при неуправляемом усреднении качества руд. Объекты исследования: рудоспуски шахты № 65 Южного рудника (сечение – 9,6 м²).

В течение эксперимента участковый рудопоток на откаточном горизонте +30м слагался из четырех самостоятельных рудопотоков: 1) из рудоспуска Р–

64, в который поступала руда из забоев очистной панели П-12; 2) из Р-52 (П-55); 3) из Р-61 (П-70 и П-71); 4) из Р-51-бис (П-60, П-62, П-63 и П-65). Всего в рудоспуски было отгружено 1196 порций (Того – 40D; 14,4м³) руды, в том числе: 239 – в Р-64, 145 – в Р-52, 433 – в Р-61 и 379 – в Р-51-бис, что соответствовало объемам 3442, 2088, 6235 и 5458м³, соответственно. Для обеспечения чистоты эксперимента все рудоспуски были предварительно очищены – в них была оставлена только небольшая рудная подушка.

Перед разгрузкой в рудоспуск каждый автосамосвал Того – 40D опробовался спектрометром РПП – 12: по поверхности руды выполнялось 15 – 20 наблюдений в режиме суммирования информации.

Руда из рудоспусков опробовалась у опрокидывателя ОКЭ-4 на рудничном дворе откаточного горизонта +30м по методике, принятой в ОТК (способ опробования – горстьевой; схема опробования вагонетки ВГ-10 – конверт; число проб с вагонетки – 1; в пробу из ВГ – 10 отбирался рудный материал в количестве 0,5 кг; соотношение мелкой и крупной фракций в пробах выдерживалось на уровне 1:4). Всего было опробовано 1722 ВГ – 10. Пробы анализировались на лабораторных спектрометрах РЛП – 21 и РЛП – 21Т.

Эффективность усреднительных процессов в рудоспусках оценивалась по показателю «степень усреднения» (Ку). Средняя величина показателя Ку по четырем рудоспускам составила Ку=1,25, в том числе по рудоспускам: 1,21 (Р-52), 1,30 (Р-64), 1,26 (Р- 62) и 1,31 (Р-51-бис).

По итогам исследований были сделаны следующие выводы: 1) усреднительные показатели капитальных рудоспусков шахт Жезказганского комплекса ТОО «Корпорация Казахмыс» недостаточны для эффективной неуправляемой стабилизации качества добытых руд; 2) требуется проведение дополнительных мероприятий по стабилизации качества руд на промежутке «забой – рудоспуск».

В качестве таких мероприятий с обязательным использованием ЯГФТОР можно рекомендовать следующие:

а) усреднение качества руды на внутришахтных автомобильных смешительных складах штабельного типа (их можно организовать в отработанных панелях) с укладкой порций (Того – 40D) руды наклонными слоями на вертикальный борт уступа и разгрузкой штабеля (Caterpillar – 980F; 3,67м³) в поперечном направлении;

б) внутришахтную рудосортировку, позволяющую на основании данных РРО забоев, РРА проб и РРК веерных отбойных скважин оставлять породу и некондиционную руду в горном массиве, складировать породу в отработанных панелях, осуществлять раздельную отработку технологических сортов руд;

в) внутришахтную сепарацию отбитой горной массы с использованием мобильных внутришахтных рентгенорадиометрических рудосортирующих комплексов на базе сепараторов СРФ4 – 50, СРФ4 – 150, СРФ4 – 3П – 150, СРФ2 – 300 ООО «Радос» (г. Красноярск, Россия) или Микро – РС – 50, РМ – 50Р, РМ – 100Р, РМ – 200 фирмы ООО «Интегра Групп. РУ» (г. Москва, Россия);

г) использование автоматических рентгенорадиометрических рудоконтролирующих станций типа «Старк» производства ТОО «КрасРадос» (г. Красноярск, Россия), РКС – КМ (ТОО «Технорос», г. Красноярск, Россия), РЛП – 3 (ООО «Геотех», г. Санкт-Петербург, Россия) у опрокидывателей рудничных дворов шахт, на шахтных конвейерах;

Применяемые в настоящее время на рудниках ПО «Жезказганцветмет» ЯГФТОР открывают дорогу на шахты новейшим научным разработкам, таким как:

1. Управляемое регулирование отгрузки руды из рудоспусков в вагонетки на откаточных горизонтах шахт по методу компьютерного моделирования [3, 4], реализующего стохастические модели заполнения рудоспусков порциями ($T_{ог} - 50+; 20,0\text{м}^3$) руды и выпуска руды из рудоспусков в вагонетки ВГ–10 или ВГ–12 (каждой порции руды в $T_{ог} - 50+$ присваиваются содержания Cu, Pb и Zn по данным последнего РРО забоя, из которого доставлена руда). Зная, что находится в каждом рудоспуске, можно путем компьютерного моделирования прогнозировать качество, выгружаемой из рудоспуска руды, как в каждую вагонетку, так и в каждый состав вагонеток. Решая, далее, обычную «транспортную» задачу, можно гарантировать нужный уровень качества товарной руды.

2. Управляемое усреднение качества руд на внутришахтных автомобильных смесительных складах штабельного типа с укладкой порций ($T_{ог} - 40D$) руды наклонными слоями на вертикальный борт уступа и разгрузкой штабеля (Caterpillar – 980F; $3,67\text{м}^3$) в поперечном направлении (стохастические процессы формирования и разгрузки штабеля моделируются на компьютере; каждой порции руды, поступающей в штабель, присваиваются содержания Cu, Pb и Zn по данным последнего РРО забоя, из которого доставлена руда).

Таким образом, внедрение рентгенорадиометрических технологий на шахтах ПО «Жезказганцветмет» позволило бы не только поднять геологическое обслуживание горно – добычных работ на более высокий уровень и значительно повысить эффективность добычного процесса в целом, но и создало бы предпосылки для внедрения в горное производство КМСРП, базирующейся на самых современных научных и аппаратурных разработках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожиев Х.Х., Ломоносов Г.Г. Рудничные системы управления качеством минерального сырья. 2-е издание. – М: Изд – во МГГУ, 2008. – 232с.
2. Ciruna, Miningmagazine, June, 1987, p. 462 – 467.
3. Чурсин С.М. Установление усреднительного воздействия рудоспусков на рудопотоки подземных рудников. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. М.: МГИ, 1992. – 21с.
4. Горбунов В.А. Методика стохастического моделирования выпуска руды на ЭВМ. Автореф. на соиск. уч. ст. к.т.н. М.: МГИ, 1973. – 22с.
5. Ефименко С.А. Применение ядерно-геофизических технологий опробования руд в ТОО «Корпорация Казахмыс» // Горный журнал Казахстана, 2009г., №1. С. 8-12.

6. Ефименко С.А. Новая концепция технического перевооружения рудников Жезказганского комплекса компании KazakhmysLLC с использованием ядерно-геофизических технологий // Журнал Сибирского федерального университета, серия «Техника и технологии». Красноярск: 2008, том 1, № 2, с. 117-125.

7. Ефименко С.А. Многофункциональная рентгенорадиометрическая система рудоподготовки для шахт ПО «Жезказганцветмет» // Караганда: Труды КарГТУ, 2008. №1. С. 54 – 59.

© С. А. Ефименко, О. С. Ефименко, В. С. Портнов, Р. К. Камаров,
Ж. З. Толеубекова, Г. К. Макишев, 2014

ОТРАБОТКА ПРИКОНТУРНЫХ УЧАСТКОВ ЗАЛЕЖЕЙ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И СПОСОБЫ ЕЕ ОЦЕНКИ

Ерик Кабдулкакович Нуржумин

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, 010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Победы, 62, доктор технических наук, профессор кафедры геодезии, тел. (8-7172)317-547, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Жанат Зекеновна Толеубекова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (8-7212)56-26-27, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Рымгали Кумашевич Камаров

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел. (8-7212)56-26-19, факс: (8-7212) 56-54-43, e-mail: ipk@kstu.kz

Дмитрий Владимирович Мозер

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (8-7212)56-26-27, e-mail: dmitri-moser@yandex.ru

Толеген Сагадатович Омурзаков

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистр кафедры маркшейдерского дела и геодезии, e-mail: tolegen_221190@mail.ru

Рассмотрены основные задачи оценки и регулирования процессов отработки приконтактных зон залежи. Приведены различные показатели при учете влияния сложности контура рудных тел при разведке и эксплуатации месторождения. Проведен анализ источников, освещающих вопросы оценки сложности геометрии приконтактных зон.

Ключевые слова: рудные залежи, приконтактная зона, геометрическая изменчивость.

MINING IN MARGINAL AREAS OF COMPLICATED-STRUCTURE ORE BODIES AND THE ORE BODY STRUCTURE COMPLEXITY EVALUATION

Erik K. Nurzhumin

Seifullin Kazakh Agricultural University, 010000, Republic of Kazakhstan, Astana, 62 Pobedy St., Dr Eng, Prof, Chair of Geodesy, tel. (7172)317-547, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Janat Z. Toleubekova

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, PhD Eng, Assistant Professor, Chair of Surveying and Geodesy, tel. (7212)56-26-27, e-mail: jtoleubekova@mail.ru

Rymgali K. Kamarov

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, PhD Eng, Professor, Chair of Mineral Mining, Head of the Center for New Training Methods and Technologies, tel. (7212) 56-26-19, fax: (7212) 56-54-43, e-mail: ipk@kstu.kz

Dmitry V. Moser

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, PhD Eng, Assistant Professor, Chair of Surveying and Geodesy, tel. (7212)56-26-27, e-mail: dmitri-moser@yandex.ru

Tolegen S. Omurzakov

Karaganda State Technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, MS, Chair of Surveying and Geodesy, e-mail: tolegen_221190@mail.ru

The article reviews basic issues of estimation and control in mining of marginal areas of an ore body. Various factors of accounting for the structural complexity of ore bodies during exploration and mining are presented. The authors discuss reference material that highlights the issues of geometrical complexity assessment in marginal areas of ore bodies.

Key words: ore bodies, marginal area, geometry variability.

Приконтурная зона представляет собой весьма осложненного участка залежи, количественный и качественный состав который формируется из смеси разновидностей горной массы перемешиваемых по мере отработки запасов полезного ископаемого в форме отдельных выемочных технологических слоев различной мощности. При этом приконтурной зоне залежи присущи динамичность и комплексное природно-технологическое формирование, что делает ее самым сложным качественснижающим выемочным участкам по руднику.

Экономическая и геологотехнологическая значимость выемочных участков сопровождаемых контактами руд и пород вытекает из отличительных их особенностей. Именно приконтурная зона является геолого-технологическим источником выходов количественно и качественно теряемых руд и металла, разубоживающих пород и техногенных отходов добываемых рудных масс. Тем самым непосредственно ведет количественному и качественному снижению рудных продуктов и их рыночной стоимости.

В связи с этим задачи оценки и регулирования процессов отработки приконтурных зон залежи изучаются с давних пор и приобретает проблемный характер в сфере недропользования по настоящее время.

Известные работы можно сгруппировать по горногеометрическим и информационным оценкам приконтурных зон залежей.

Горногеометрические оценки сложности основаны на разработке геолого-геометрических характеристик сложности в основном лишь геометрии залегания залежей, и размещения рудных, и внутрирудных мощностей. Основное направление работ формировалось на базе принципа геометрической оценки изменчивости признаков, методов геометрии недр, в которых пространственное размещение признаков отражается по своему содержанию топофункциями и горногеометрическими графиками. При этом оценка распространения признака

проводилась на геометрической основе, с отображением характера изменчивости признака геометрически, а интенсивности – числом.

Разнообразие геологогеометрических элементов и характера залегания на приконтактных зонах рудных залежей в пределах выемочной единицы (уступа, камеры и т.д.), что присуще почти всем рудным месторождениям, обуславливает степень сложности приконтактных участков залежи. Для учета влияния сложности контура рудных тел при разведке и эксплуатации месторождения предложены различные показатели сложности.

Бастаном П.П. и Оснеговским Е.Р. [1,6] модели потерь и разубоживания представлены в виде градиентных показателей сравнения качества добычных работ, показывающих сколько тонн руды или разубоживающей породы в приконтактной зоне приходится на 1 п.м. или на 1 м² площади контакта. Предложены их использовать для установления взаимосвязи потери и разубоживания, и сравнения качества добычных работ при отработке зон контактов руд и пород. Непосредственное применение моделей потерь и разубоживания и показателя изменчивости длины контактов, для обоснования нормативных значений их для железорудных карьеров, рассматривается в работе [2].

Шариным В.В. [3] в качестве критерия оценки степени сложности селективной разработки, предлагается так называемый коэффициент развития контактных зон ($K_{p.k.с.}$), вычисляемый как отношение объема рудного тела (v_p) к площади его поверхности (s_k).

$$K_{p.k.с.} = \frac{v_p}{S_k} = \frac{S_{cp} \sin \alpha}{\sum l}, \quad (1)$$

где α - угол падения контактов в плоскости чертежа, град.; $\sum l$ - средняя суммарная длина контактов в сечении, м.

Автор указывает, что для сложноструктурных месторождений показатель $K_{p.k.с.}$ более полно, чем мощность и угол падения, характеризует условия залегания рудных тел (рис. 1).

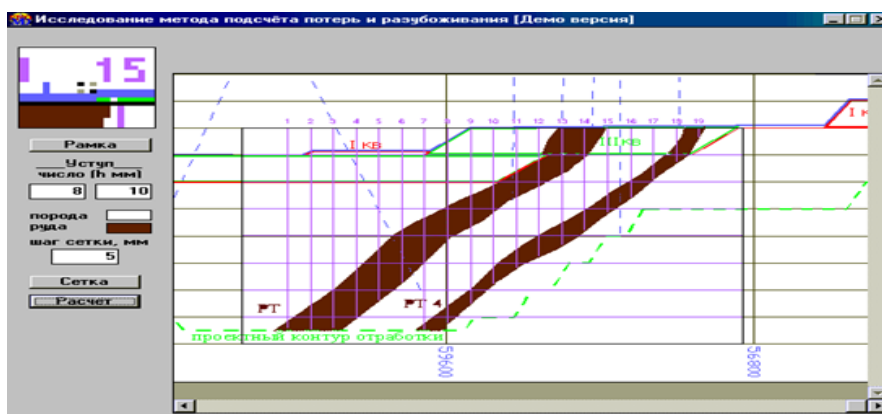


Рис. 1. Исходная геологическая информация крутопадающих рудных тел

В работе [4], в качестве критерия оценки сложности залегания, предлагается так называемый коэффициент сложности геолого-морфологического строения блока, определяемый как отношение суммарной площади приконтактных слоев по всем разрезам блока к общей площади (S_i) всех геологических разрезов по блоку, т.е.

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{i=P} \varpi_{i\delta} L_{K_i}}{\sum_{i=1}^{i=P} S_i}, \quad (2)$$

где $\varpi_{i\delta}$ - мощность слоя пустых пород, попадающих в руду, или мощность слоя руды, попадающей в породу при экскаваторной выемке, м; L_{K_i} - суммарная длина контакта тел в пределах i -го геологического разреза, м; S_{K_i} - площадь i -го геологического разреза, м².

Величину $\varpi_{i\delta}$ рекомендуется определить путем расчета, исходя из условия минимального допустимого разубоживания в зависимости от ширины ковша при разработке приконтактных зон.

Проф. Г.Г. Ломоносов [5], в качестве показателя сложности залегания рудного тела, учитывающего криволинейную форму контактов и их размеров, предлагает использовать отношение части объема залежи в приконтактной зоне, отрабатываемой с прихватом боковых пород ($v_{нк}$), к общему объему залежи ($v_{об}$):

$$\lambda = \frac{v_{нк}}{v_{об}} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n S_{k_i}}{\sum_{i=1}^n v_i}, \quad (3)$$

где $\sum S_k$ - общая площадь поверхности контакта залежи, м².

Показатель λ основан на технологической и геометрической оценке сложности залегания разрабатываемых рудных тел.

В работе [6] коэффициент сложности строения принят равным отношению средневзвешенного объема однородной горной массы, которую необходимо вынимать отдельно (v_i), к объему всей залежи (v_o).

В работе [7] предложен новый метод аналитического описания сложности приконтактной зоны залежи, основанный на привлечение иерархии формирования ее структуры.

Общая модель оценки сложности приконтактной зоны залежи по уровням иерархии формирования ее структуры аналитически выражается обобщенно в виде:

$$\varphi_{nz} = \frac{M[\Delta'_{x/y}]}{H_{x/y}} \ln \Omega_{y/x}, \quad (4)$$

где $M[\Delta'_{x/y}]$ - показатель изменчивости признака.

Основной параметр, определяемый как отношение величины математического ожидания $M(\Delta'_{x/y})$ к величине неопределенности $(H_{x/y})$, характеризует среднюю интенсивность изменения входного фактора изучаемой подсистемы $\lambda_{x/y} = \frac{M(\Delta'_{x/y})}{H_{x/y}}$. Входные и выходные факторы, как взаимосвязанные элементы

системы «приконтактные зоны залежи», выражаются в виде природно-геологических и искусственно-горногеометрических факторов освоения полезных ископаемых. Входные факторы представляют собой в общем смысле затратные элементы производства, а выходные факторы – элементы конечной продукции. Второй член модели сложности приконтактных зон залежей $\ln \Omega$ представляет собой показатель условного разнообразия значений выходного фактора, оцениваемого относительно входного фактора подсистемы. Этот показатель, как характеристика разнообразия выходных показателей подсистем, определяется по формуле:

$$\ln \Omega_{y/x} = \ln \left(d_{y/x}^{\max} - d_{y/x}^{\min} \right). \quad (5)$$

Аналитическое выражение модели сложности приконтактных зон залежей, путем некоторого преобразования для получения сопоставимых результатов, представлено в виде:

$$\varphi_{nz} = e^{kv} [\ln(d_{\max} - d_{\min}) - 1], \quad (6)$$

где $d_{\max}, d_{\min}$ - соответственно максимальное и минимальное значения выходных показателей.

Значение величины сложности φ_{nz} колеблется в пределах от 0 до 1, в процентах от 0 до 100%.

Работы по обоснованию рациональных способов оценки сложности приконтактных зон залежей с привлечением информационных мер в настоящее время нашли широкое распространение в биологии, геологии, геохимии, геометрии недр и т.д. В горной геометрии приемлемость теоретико-информационных методов исходила из концепции, что результаты опробования залежи полезного ископаемого представляет собой выборку из разных сово-

купностей случайных величин, рассматриваемые как реализации нестационарного случайного поля, математическое ожидание и дисперсия которых зависят от изучаемого горногеометрического поля недр.

Различные аспекты использования теории информации в геологии впервые освещались в работах [8-10].

А.Б. Вистелиусом [8] для оценки изменчивости концентрации химических элементов, предложен информационный коэффициент, определяемый по формуле:

$$H_i = \frac{\ln - H}{\ln n}, 0 \leq H_i \leq 1. \quad (7)$$

Величину энтропии H он определяет по формуле, дающей несмещенную оценку:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i + \frac{n}{2N}, \quad (8)$$

где N – число наблюдений; n – количество подобъектов, отличающихся по совокупности свойств.

Т.Г. Петров и С.В. Мошкин [9] показали величину информационной энтропии, которая рассмотрена как характеристика сложности химического состава систем.

Вопросам использования связи между значениями информационных характеристик минералов и их термодинамическими параметрами и привлечением для этой цели концепции неэнтропийного принципа информации посвящены работы Ф.А. Летникова, М.Л. Антокольского и других [9,10].

Первой работой, в которой при изучении геологического поля применялся системный подход, является работа проф. В.Ф. Мягкова [11]. В этой работе регулярная и случайная составляющие геологического поля описываются на основе иерархического уровня структурирования, уровни предварительной разведки, детальной разведки и уровни эксплуатационной разведки и эксплуатационного опробования. Уровневые составляющие изменчивости обладают знакопеременностью и относительностью и отличаются степенью изученности и плотностью информации. Однако, оценки ограничиваются только с точки зрения процесса геологической разведки.

М.М. Чагин [12-14] и авторы [13,14] для количественной оценки сложности геохимических систем, предлагают использовать формулу энтропии как более эффективной информационной меры. В настоящее время известны другие информационные оценки сложности или неоднородности систем, основанные на дисперсионных мерах и корреляционной теории случайных функций, топографических съемках и планах, геохимических, термодинамических и других системах, которые могут быть использованы в горной геометрии.

Из анализа источников, освещающих вопросы оценки сложности геометрии приконтактных зон с учетом практики их использования, вытекают выводы, используемые в качестве методологических концепций для дальнейших исследований по этой проблеме.

1. Показатели сложности контура залежи, предложенные различными авторами, основаны на геолого-геометрической оценке контура рудного тела. Этот показатель часто представлен как градиент, учитывающий тонны теряемой руды, приходящейся на единицу длины контакта. Общим горногеометрическим подходом к оценке сложности геометрии контакта руд и вмещающих пород является метод графо-аналитического описания сложности их строения как приведенного показателя, определяемого отношением фактического размера горногеометрического параметра к его соответствующему базовому размеру. В качестве базового размера используется длина горизонтальной проекции искомой величины или какой-либо другой ее геометрический размер.

2. Показатели сложности залегания, основанные на технологической и геометрической оценке учитывают степень отклонения геологической поверхности контакта относительно технологической поверхности отработки рудного тела. Показатели определяются размерами площадей (или объемов) приконтактных зон и рудных тел, и т.д.

3. Оценка сложности контактов руд и вмещающих пород проводится без достаточного учета горнотехнологических показателей приконтактных зон. Вследствие этого результаты оценок носят ограниченный характер. Следовательно, при оценке геометрии контактов руд и вмещающих пород следует привлечь методы системных исследований, что позволяет учесть все разнообразные факторы, на формирование которых влияют сложность приконтактных зон залежей.

4. Существующие информационные оценки и меры недостаточно чувствительны к изменениям составляющих из-за несоизмеримости их с оцениваемыми параметрами, чем и обусловлена недейственность их использования. При этом, почти все существующие информационные оценки и меры относятся лишь к задачам геологической разведки, а не к горногеометрическим и горнотехнологическим задачам отработки залежей..

5. Рекомендуемый системно-уровенный подход к оценке строения приконтактных зон залежей заключается в том, что сложность горногеометрической структуры приконтактной зоны оценивается дифференцированно по уровням иерархии ее формирования по трем стадиям (разведки, проектирования, выемки) освоения месторождения. Такой структурно-иерархический подход к оценке структуры приконтактной зоны обусловлен разнообразностью собственных целей решаемых задач, и разностепенностью сложности приконтактных зон по уровням развития процессов разведки, проектирования и выемки залежей. Здесь стратегия координации сводится к установлению оптимальности процесса учета различных аспектов влияния сложности и характера строения приконтактных зон залежей на решаемые задачи разведки, проектирования и выемки с достаточной полнотой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бастан П.П. и др. Методика установления связи между потерями и разубоживанием руды для Гусевгорского месторождения. Сб. «Вопросы рационализации маркшейдерской службы на горных предприятиях Урала». // Научные труды СГИ, Свердловск, 1968..
2. Бастан П.П., Ивченко А.Н., Дука В.В. Анализ изменчивости формы залегания рудных тел и качества руд Сарбайского месторождения. // Труды СГИ, вып.64, - Свердловск: 1966. – С.61-64.
3. Шарин В.В. Оценка сложностей селективной разработки месторождений по степени контактных зон. Совершенствование технологии открытых горных работ // – М.: Недра, 1966. – С.124
4. Юматов Б.П. и др. Открытая разработка сложноконструкторных месторождений цветных металлов. – М.: Недра, 1973. – С.191
5. Ломоносов Г.П. Исследование формирования качества руды // Монография. – М.: 1982. – С.216
6. Оснеговский Е.Р. Сравнение качества добычных работ при открытой разработке месторождений // В сб.: Проблемы работы карьеров Севера. – М.:1968. – С.61-63.
7. Курманкожаев А.К. Полнота выемки запасов руд при современном уровне развития горнорудной техники для подземных рудников. Сб.: Совершенствование подземной разработки черных и цветных металлов // Труды Всесоюзной научно-технической конференции. – Алма-Ата: 1984. – С.150-152.
8. Вистелиус А.Б. Задачи геохимии и информационные меры. Советская геология, №12. – Л.: 1964. – С.5-26.
9. Дементьев Л.Ф. и др. Применение информационных мер в нефтепромысловой геологии // – Пермь: 1974. – 156 с.
10. Артокольский М.Л. Теория информации и ее применение к геофизике // Обзор, вып.18 (2). – М.: ВИЭМС, 1965. – С.94
11. Мягков В.Ф. Геометризация и анализация геологических полей месторождения полезных ископаемых // – Свердловск: Горный журнал, №10, 1981.
12. Чагин Н.Н. О применении информационных мер при решении задач геологического прогнозирования // Известия АН СССР, сер. «Геология», №11. – М.: 1969. – С.80-86.
13. Букринский В.А., Коробченко Ю.В. Применение вероятностной теории информации при геометризации месторождений. В кн.: Применение математических методов и ЭВМ // – Новочеркасск: Волгодонское территориальное управление, 1975. – С.49-50.
14. Неумывакин Ю.К. Об определении характеристики сложности стереорисовки рельефа на основе теории информации // Журнал «Геология и аэрофотосъемка». – М.: вып.6, 1967. – С. 121-128.

© Е. К. Нуржумин, Ж. З. Толеубекова, Р. К. Камаров,
Д. В. Мозер, А. И. Омурзаков, 2014

АЛГОРИТМ ЗАПОЛНЕНИЯ ПРОБЕЛОВ И ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК В ГЕОЛОГО-ПРОМЫСЛОВЫХ ДАННЫХ

Вадим Владимирович Татарников

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: vadim.tatarnikov@gmail.com

Николай Григорьевич Загоруйко

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 4, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией анализа данных, e-mail: zag@math.nsc.ru

Разработан алгоритм заполнения пробелов в таблицах геолого-промысловых данных на основе понятия компактности данных и функции конкурентного сходства. Алгоритм применён к реальной задаче, что позволило на его основе предложить критерий для обнаружения ошибок.

Ключевые слова: заполнение пробелов, функция конкурентного сходства.

GAP COMPLETION AND ERROR DETECTION ALGORITHM OR THE FIELD-GEOLOGICAL DATA

Vadim V. Tatarnikov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Student, e-mail: vadim.tatarnikov@gmail.com

Nikolay G. Zagoruiko

Sobolev Institute of Mathematics, 630090, Russia, Novosibirsk, 4 Prospect Koptuuga, Dr Eng, Prof, Head of Laboratory, e-mail: zag@math.nsc.ru

The article deals with development of an algorithm for gap completion in field-geological data on the basis of the notions of data compactness and function of rival similarity (FRiS). The algorithm is applied to a real task, which allows proposing an error detection criterion.

Key words: gap completion, function of rival similarity.

Одной из характерных проблем современной нефтяной индустрии является высокая степень неопределённости данных, собираемых автоматическими системами мониторинга геолого-промысловых объектов. Как правило, эти данные представляют собой таблицы, где с фиксированным интервалом представлены показатели давления в системе, время работы скважины, а также показания расходомеров (дебиты) каждой скважины. Таким образом, эти данные представимы в виде трёхмерной таблицы «объект-свойство-время» или «куба данных». Проблема неопределённости заключается в том, что из-за технических неисправностей и человеческого фактора некоторые клетки этих таблиц могут быть существенно искажены или отсутствовать. Для дальнейшей обработки таких данных ошибки в них необходимо обнаруживать, а пробелы заполнять.

Для решения обозначенной проблемы были проанализированы данные 11 параметров 13 скважин за 4 месяца, а также проведён обзор алгоритмов заполнения пробелов в таблицах данных. Помимо простых локальных методов вроде скользящего среднего или k ближайших соседей (kNN), в настоящее время широко используются алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов: регрессия[1] и метод главных компонент[2], применяются алгоритмы на основе оценки максимального правдоподобия[3], позволяющие подбирать распределение величин в таблице. Однако методы, упомянутые выше, действуют глобально: в них предполагается, что зависимость заданного типа реализована на всех объектах, поэтому и в оценивании зависимостей участвуют все строки и столбцы. Применение указанных методов потребует предобработки данных: выделения трендов для применения регрессии или кластеризации для выделения групп объектов и признаков, подчиняющихся распределению определённого вида.

Алгоритм, действующий локально, т.е. оценивающий зависимости в некоторой окрестности предсказываемого объекта, был впервые предложен в работе [4], описывающей алгоритм ZET для таблицы вида «объект-свойство». Его основная идея заключается в том, чтобы для восстановления значения одного элемента исходной таблицы найти некоторую подтаблицу, с помощью которой, используя регрессию по строкам и столбцам, восстановить значение целевого элемента. Используются предположения об избыточности данных – наличии похожих столбцов и строк, а также о локальной компактности в данных – из сходства объектов по описывающим признакам следует сходство в целевом.

Обозначим объекты (скважины) множеством A , признаки (параметры) множеством X и моменты времени множеством T , тройкой $\langle A, X, T \rangle$ куб данных, а тройкой $\langle a, x, t \rangle$ элемент куба лежащий на пересечении $a \in A$, $x \in X$, $t \in T$. Пусть необходимо восстановить значение элемента $\langle a_0, x_0, t_0 \rangle$; для применения ZET потребовалось бы составить таблицу путём вертикального соединения двумерных таблиц $\langle a_i, X, T \rangle$, $a_i \in A$. Однако, в этом случае алгоритмом никак не учитывается принадлежность отдельно взятого элемента конкретному объекту, тогда как эта информация в исходных данных имеется и может оказаться полезной. В данной работе предложена модификация ZET для работы с кубами данных, использующая те же предположения об избыточности и локальной компактности. В отличие от ZET, алгоритм оперирует не отдельными строками и столбцами, а сечениями $a \in A$, $x \in X$, $t \in T$ и оценивает компактность получившегося подкуба при помощи меры компактности на основе функции конкурентного сходства (FRiS). Функция FRiS используется для вычисления меры сходства сечений и определяется как

$$F(a, a_0 | a^*) = \frac{r(a, a^*) - r(a, a_0)}{r(a, a^*) + r(a, a_0)},$$

где $r(a_i, a_j) = \sum_x \sum_t (\langle a_i, x, t \rangle - \langle a_j, x, t \rangle)^2$ – Евклидово расстояние между сечениями.

Значение функции F меняется в пределах интервала $[-1; +1]$ и характеризует, насколько сечение a похоже на сечение a_0 в конкуренции с a^* , а среднее значение $F(a, a_0|a^*)$ по выборке сечений $a \in A' \subset A$ можно рассматривать в качестве меры компактности. Аналогичным образом вычисляются компактности сечений $X' \subset X$ и $T' \subset T$.

Алгоритм 1. Вычисление компактности подкуба $\langle A', X', T' \rangle$.

0. Пусть целевой элемент лежит на пересечении a_0, x_0, t_0 .

1. По каждому из направлений A, X, T найдём наиболее удалённые от целевого сечения:

$$a^* = \arg \max_{a \in A'} r(a, a_0),$$

$$x^* = \arg \max_{x \in X'} r(x, x_0),$$

$$t^* = \arg \max_{t \in T'} r(t, t_0).$$

2. Вычислим средние значения конкурентного сходства по направлениям:

$$C_{A'} = F_S^{A'}(a, a_0) = \frac{1}{|A'|} \sum_i^{|A'|} F(a_i, a_0|a^*),$$

$$C_{X'} = F_S^{X'}(x, x_0) = \frac{1}{|X'|} \sum_i^{|X'|} F(x_i, x_0|x^*),$$

$$C_{T'} = F_S^{T'}(t, t_0) = \frac{1}{|T'|} \sum_i^{|T'|} F(t_i, t_0|t^*).$$

3. Положим $C\langle A', X', T' \rangle$ равным среднему значению компактностей:

$$C\langle A', X', T' \rangle = \frac{1}{3} (C_{A'} + C_{X'} + C_{T'}).$$

Таким образом, задачей алгоритма является формирование подкуба $\langle A', X', T' \rangle$ с максимальной компактностью C , т.е. являющимся решением задачи:

$$C\langle A', X', T' \rangle \xrightarrow[\substack{A' \subset A \\ X' \subset X \\ T' \subset T}]{\text{max}}$$

Её решение путём перебора всех возможных конфигураций сечений требует порядка $|A'|! \times |X'|! \times |T'|!$ вычислений компактности, поэтому опираясь на гипотезу избыточности данных, целесообразно применять приближённый алгоритм. Поскольку необходимо максимизировать сумму слагаемых из интервала $[-1; +1]$, то для увеличения этой суммы требуется выбирать только положительные, т.е. исключать сечения, имеющие отрицательное сходство с целевыми. В то же время этот процесс необходимо ограничивать, чтобы подкуб не уменьшался слишком быстро в конечном итоге до размера $2 \times 2 \times 2$. Заметим также и такое свойство $F_S^{A'}(a, a_0)$: при равномерном распределении a_i между a_0 и a^* данная величина равна 0. Приведённые соображения позволяют составить следующий алгоритм:

Алгоритм 2. Приближённый алгоритм формирования подкуба $\langle A', X', T' \rangle$.

1. Положим искомый подкуб равным исходному кубу

$$A' = A, T' = X, T' = T.$$

2. Повторять:

2.1. Пополним подкуб небольшим числом k случайно выбранных сечений отброшенных на предыдущих шагах:

$$A' = A' \cup rand_n^k(A \setminus A'), X' = X' \cup rand_n^k(X \setminus X'), T' = T' \cup rand_n^k(T \setminus T').$$

2.2. Найдём наиболее удалённые от целевых сечения a^*, x^*, t^* .

2.3. Вычислим компактность $C = C\langle A', X', T' \rangle$.

2.4. Если не выполнен критерий остановки:

2.4.1. Исключаем сечения с отрицательным сходством

$$A' = \{a \in A': F(a, a_0 | a^*) \geq 0\}, X' = \{x \in X': F(x, x_0 | x) \geq 0\},$$

$$T = \{t \in T': F(t, t_0 | t^*) \geq 0\}.$$

3. Иначе: конец.

Процедура 1.1 здесь аналогична процедурам релаксации в приближённых алгоритмах и используется для контроля над скоростью уменьшения размеров подкуба. Величина k – количество возвращаемых сечений – может быть как константой, так и зависеть от числа сечений, исключённых на предыдущей итерации. Благодаря процедуре 1.1, сечения, исключённые ранее, могут быть возвращены в подкуб и улучшить его компактность. Особого внимания заслуживает критерий остановки, являющийся индикатором выполнения одного или нескольких условий:

1. Компактность C подкуба достигла локального экстремума или превысила заранее заданное значение C_{stop} .

2. Размер подкуба достиг минимально допустимого значения $n_{min} \times m_{min} \times t_{min}$.

3. Если по одному из направлений количество сечений с отрицательным сходством слишком велико, т.е. $|a \in A': F(a, a_0 | a^*) < 0| > \alpha |A'|$ и их исключение приведёт к значительному уменьшению размеров подкуба целесообразно не исключать сечения на этом шаге, а подождать следующего. Таким образом, выполнение этого условия по каждому из направлений A, X, T останавливает работу алгоритма. Опытным путём установлена величина коэффициента, при $\alpha = 0.6$ обеспечивается баланс между скоростью уменьшения размеров подкуба и его результирующей компактностью.

Получив компактный подкуб $\langle A', X', T' \rangle$ и опираясь на гипотезу локальной компактности, можно перейти к восстановлению значения пропущенного элемента $\langle a_0, x_0, t_0 \rangle$. Для этого предложим несколько методов. Усреднение целевой характеристики x_0 по времени. В случае если сечения $t \in T'$ представляют собой некоторую окрестность t_0 , результат будет эквивалентен применению алгоритма скользящего среднего, в противном случае – алгоритма k ближайших соседей. Усреднение целевой характеристики x_0 по объектам в момент времени

t_0 позволит найти среднее значение этой характеристики у «похожих» объектов. Более полно раскрыть информацию о сходстве объектов и признаков позволит многомерная регрессия в сечении целевого объекта a_0 . При этом вид её членов (линейные, полиномиальные и др.) выбирается на основании предположений о возможном характере зависимостей в данных.

Разработанный алгоритм построения компактного подкуба и восстановления пропущенного значения был применён для оценки согласованности данных дебита с историей изменений параметров скважин. Для оценки точности работы алгоритма использовался метод перекрёстной проверки. Обозначим параметр «дебит» x_{yield} . Далее каждый элемент $\langle a, x_{yield}, t \rangle, a \in A, t \in T$ исходного куба положим неизвестным при известных остальных, построим компактный подкуб, восстановим значение с помощью линейной регрессии по столбцам сечения целевой скважины и сравним с известным значением. Среднее значение относительной ошибки в данном эксперименте составило 2%, гистограмма ошибки приведена на рисунке.

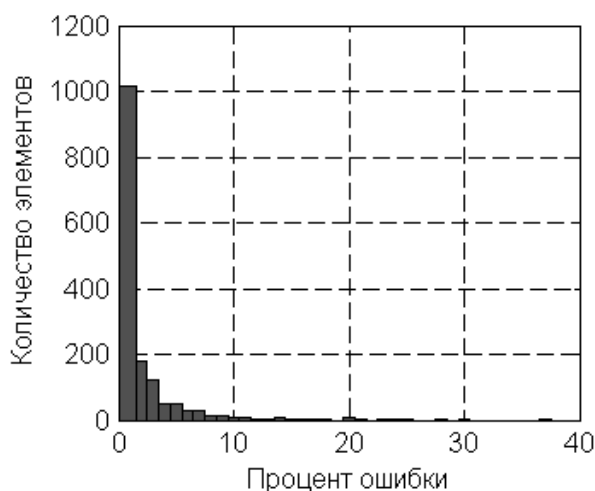


Рис. Гистограмма относительной ошибки при перекрёстной проверке

В частности, восстановленные значения 96% исследуемых ячеек отклонены от реальных значений не более чем на 10%. Эта статистическая информация может использоваться в качестве критерия оценки ошибок поступающих данных в будущем. Периодический пересчёт статистики позволяет сделать этот критерий адаптивным во времени. Разработанный алгоритм может применяться самостоятельно, либо в составе каскада фильтров для повышения точности обнаружения ошибок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бак С. (Buck S. F.) A method of estimation of missing values in multivariate data // J. Roy. Statist. Soc. Ser. B. 1960. V. 22.

2. Глисон Т., Стелин Р. (Gleason T. C., Staelin R.) A proposal for handling missing data // Psychometrika. 1975. 40.
3. Демпетер А., Лерд Н., Рабин Д. (Dempster A. P., Laird N. M., Rubin D. B.) Maximum likelihood from incomplete data via the EM-algorithm // J. Roy. Statist. Soc. Ser. B. 1977. V. 39.
4. Загоруйко Н. Г., Елкина В. Н., Темиркаев В. С. Алгоритм заполнения пропусков в эмпирических таблицах (алгоритм ZET) // Эмпирическое предсказание и распознавание образов. Новосибирск, 1975, Вып. 61, Вычислительные системы.

© В. В. Татарников, Н. Г. Загоруйко, 2014

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА БАРЬЕРНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)335-96-42, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Андрей Владимирович Патутин

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

Сергей Владимирович Сердюков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией физических методов воздействия на массив горных пород, тел. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

В статье приведены результаты физического моделирования способа барьерного экранирования для улучшения герметизации дегазационных скважин угольных пластов.

Выявлено, что применение барьерного экранирования с давлением в экране на 1 МПа меньше давления сжатия экрана вмещающей средой снижает фильтрацию воздуха не менее чем в 135 раз, а при давлении, равном его сжатию, не менее чем в 560 раз. Наилучшие результаты получены для двухслойной конструкции экрана с внешним слоем из полиакрилатной пропитки и внутренней полостью с вязким индустриальным маслом.

Ключевые слова: физическое моделирование, дегазация угольных пластов, барьерное экранирование, герметизация скважин.

PHYSICAL MODELING OF BARRIER SHIELDING

Tatiana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)335-96-42, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Leonid A. Rybalkin

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Postgraduate Student, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Andrey V. Patutin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Sergey V. Serdyukov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Physical Treatment of Rock Mass, tel. (383)335 9642, e-mail:ss3032@yandex.ru

The article describes physical modeling of barrier shielding aimed to improve sealing of coal degassing wells. It has been found that the barrier shielding with the shield pressure 1 MPa lower than the shield compression by the enclosing rock mass decreases 135 times air filtration; when the shield pressure and the shield compression are equal in value, the air leak reduction is 560 times. The best sealing is gained with the two-layer shield, with the outer layer manufactured as polyacrylate impregnation and the inner layer made of viscous industrial oil.

Key words: physical modeling, coal degassing, barrier shielding, well sealing.

Надежная герметизация дегазационных скважин, пробуренных из горных выработок, является основным способом борьбы с подсосами воздуха из горной выработки, которые снижают эффективность дегазации, ведут к образованию опасной метановоздушной смеси и затрудняют промышленное использование газа.

В статье предложен способ барьерного экранирования дегазационных скважин угольных пластов, приведены результаты его физического моделирования. В горной породе, окружающей скважину, создается поперечный оси скважины экран, заполненный вязкой жидкостью под небольшим давлением, который препятствует фильтрации воздуха из горной выработки в дегазационную скважину. Физическое моделирование проводилось с целью исследования влияния различных наполнителей экрана на его газопроницаемость, выбора оптимальных параметров экрана в зависимости от условий окружающего массива.

Для физического моделирования был разработан стенд, состоящий из испытательной камеры и пневмогидравлической системы со встроенными в нее средствами измерения (рис. 1). Подробное описание стенда приведено в работе [1]. Вся конструкция позволяет моделировать напряженное состояние горной породы, обеспечивает прокачку через образец горной породы воздуха, а также подачу в пространство между кренами, моделирующего барьерный экран, жидкого герметика под давлением.

На первом этапе эксперименты проводились с образцами угля. Для заполнения модели экрана использовались анаэробный пропитывающий герметик «Анатерм-1» (кинем. вязкость $14 \text{ мм}^2/\text{с}$) (ТУ 6-01-1300-85), гидроизолирующая пропитка "Гидрофакс-Аэро" (кинем. вязкость $3\text{-}4 \text{ мм}^2/\text{с}$), силиконовый герметик RTV-LSR (вязкость $110 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

Для имитации расположения барьерного экрана в зоне разгрузки горной выработки, максимальное значение одноосного сжатия в экспериментах было ограничено величиной 4 МПа. Боковое сжатие выбиралось равным одноосному сжатию (равномерное напряженное состояние). Качество герметизации оценивалось по разнице давлений в аккумуляторе АК1 через 60 и 30с после выключения вакуумного насоса – закрытия вентиля ВН1 (рис. 1). На рис. 2 приведены результаты исследований герметика «Анатерм-1», давшего лучшие результаты

из трех экспериментальных жидкостей - зависимость качества герметизации от разницы давлений P_3-P_2 .

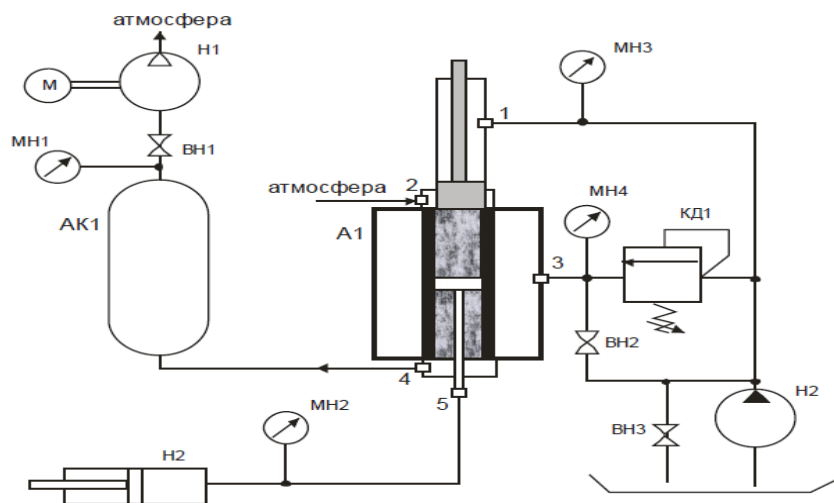


Рис. 1. Пневмогидравлическая система:

Н1 - вакуумный насос; Н2 - гидравлический ручной насос высокого давления;
НЗ - пресс-расходомер; ВН1-ВН3 - вентили, МН2-МН4 - манометры высокого давления;
МН1 - манометр разряжения; А1 - испытательная камера стенда;
АК1 - газовый аккумулятор; КД1 - клапан давления регулируемый

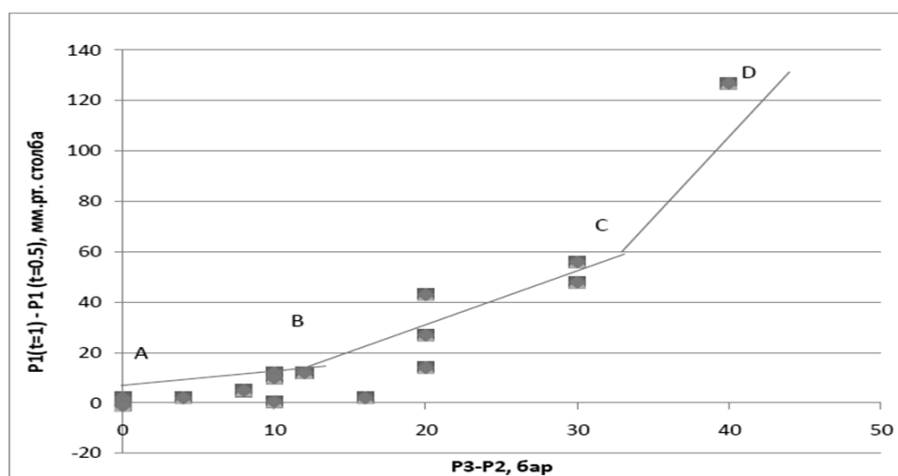


Рис. 2. Зависимости величины восстановления давления P_1 в аккумуляторе АК1 в интервале времени от 30 до 60 с. после выключения вакуумного насоса от разницы значений осевого сжатия P_3 и давления герметика "Анатерм-1" в модели экрана P_2

По результатам экспериментов выявлено, что для достижения качественной герметизации дегазационных скважин давление герметика в экране не должно отличаться от сжимающего напряжения более чем на 15 бар (на рис. 2 на отрезке АВ в диапазоне P_3-P_2 от 0 до, примерно, 15 бар, качество герметиза-

ции наилучшее и мало зависит от значения РЗ-Р2.). Для выполнения дальнейших испытаний был отобран герметик «Анатерм - 1».

На втором этапе проводились эксперименты по влиянию барьерного экранирования на газопроницаемость среды. Оценка проницаемости проводилась по методике и расчетным формулам ГОСТ 26450.2-85 [2]. Измерения расхода газа выполнялось реометром РКС-1, соответствующим техническим условиям ГОСТ 9932-75 [3]. Эксперименты проводились в условиях равномерного сжатия модели давлением 3МПа.

В результате испытаний в лабораторных условиях получено, что применение барьерного экранирования с давлением в экране на 1 МПа меньше давления сжатия экрана вмещающей средой, снижает газопроницаемость среды не менее чем в 135 раз, а при давлении в экране равном его сжатию, не менее чем в 560 раз.

В ходе проведенных испытаний выявлено, что применение полимеризующейся рабочей жидкости вызывает серьезные проблемы при очистке и техобслуживании оборудования. С другой стороны закачка высоковязких жидкостей предъявляет повышенные требования к насосному оборудованию, гидравлической арматуре и соединителям. Наилучшим выходом является применение рабочих жидкостей, вязкость которых возрастает после их закачки в полость барьерного экрана, а также составов, которые полимеризуются в трещине гидроразрыва, но не полимеризуются внутри оборудования. С учетом этого для дальнейших экспериментов было выбрано гидравлическое масло марки МГЕ-46В (предварительно нагретое, при остывании в углепородном массиве оно увеличивает свою вязкость) и двухкомпонентный акрилатный гель CarboCrilHv (смешение компонент происходит непосредственно в полости барьерного экрана).

На третьем этапе эксперименты проводили с использованием кернов песчаника диаметром 30 мм, высотой 30 мм, пористостью 20%. Для моделирования напряженного состояния вмещающего массива в месте установки барьерного экрана осевое сжатие модели меняли. Значение бокового сжатия во всех экспериментах составляло 5 МПа, а температуры окружающей среды – от 18 до 20 °С. Результаты обработки данных для гидравлического масла МГЕ-46В представлены на рис. 3,4.

По результатам экспериментов выявлено, что оба исследуемых состава обеспечивают достаточное (в 100 и более раз) снижение газопроницаемости при давлениях не ниже давления осевого сжатия модели. Такое давление достаточно для раскрытия полости экрана, его заполнения рабочей жидкостью и создания сплошного непроницаемого экрана.

По результатам проведенных лабораторных исследований для возведения барьерных экранов предлагается применение сразу нескольких испытанных герметиков. Разработана схема трехэтапной постановки барьерного экрана.

На каждом из этапов закачиваются различные рабочие жидкости:

1. Формирование внешней изоляционной корки (двухкомпонентный акрилатный гель CarboCrilHv низкой вязкости) вокруг полости экрана.
2. Закачка основного заполнителя экрана, гидравлическое масло марки МГЕ-46В, нагретое до температуры 40-50° С, в полость экрана.

3. Формирование на устье трещины пробки, запирающей полость экрана с помощью полимеризующегося двухкомпонентного состава CarboCrilWv.

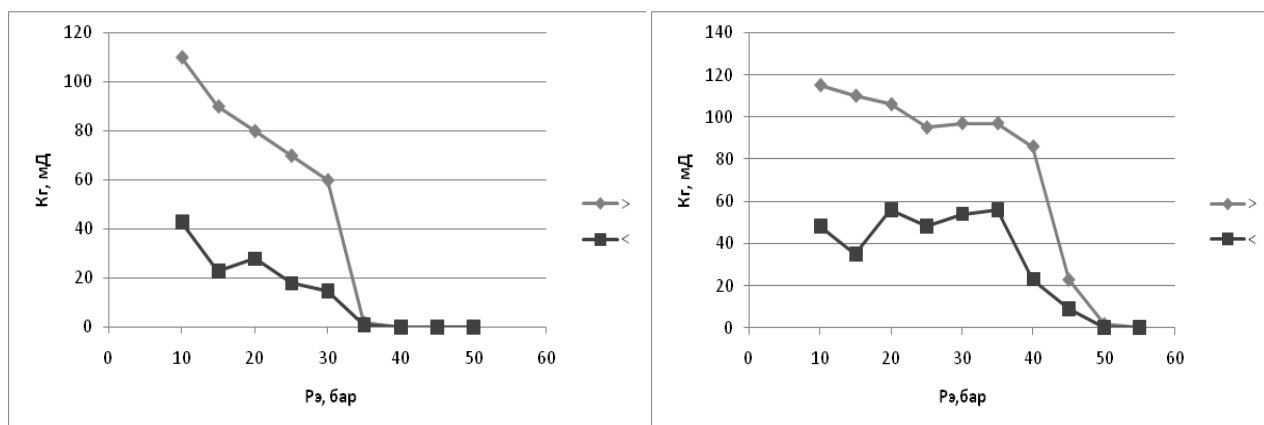


Рис. 3,4. Зависимость газопроницаемости модели Кг от давления гидравлического масла МГЕ-46В в барьерном экране Рэ при повышении (>) и снижении (<) давления. Условия эксперимента: давление осевого сжатия модели 40 бар (рис. 3), 50бар (рис. 4), бокового обжима 50 бар; температура 20 °С

Результаты физического моделирования показали, что применение барьерного экранирования с давлением в экране на 1МПа меньше давления сжатия экрана вмещающей средой снижает фильтрацию воздуха не менее чем в 135 раз, а при давлении равном его сжатию, не менее чем в 560 раз. Наиболее подходящими заполнителями экрана оказались двухкомпонентные акрилатные гели CarboCrilHv, CarboCrilWv, гидравлическое масло МГЕ-46В. Также разработана двухслойная конструкция экрана, которая позволяет без сложностей прокачивать герметики до полости барьерного экрана, исключает применение дорогих растворителей для очистки оборудования, устраняет необходимость использования оборудования для поддержания экрана в раскрытом состоянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №14-05-31175).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shilova T., Patutin A., Serdyukov S. Sealing quality increasing of coal seam gas drainage wells by barrier screening method // 13th SGEM Geo Conference on Science and Technologies In Geology, Exploration and Mining, SGEM2013 Conference Proceedings, June 16-22, 2013. – Vol. 1. – P. 701–707.
2. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. - Введ. 1985-02-27. - М. : Изд-во стандартов 1985. -17.с.
3. ГОСТ 9932-75. Реометры стеклянные лабораторные. Технические условия. - Введ. 1977-01-01. - М.: Изд-во стандартов 1994. - 21.с.

© Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. В. Патутин, С. В. Сердюков, 2014

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ЦЕЛИКА ПОД ВОДОНОСНЫМ ГОРИЗОНТОМ¹

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)217-05-41, e-mail: vbarl@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, тел. (383)217-03-37, e-mail: gahoval@mail.ru

По результатам численного моделирования и данным натурных наблюдений выполнена прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния предохранительного целика под водоносным горизонтом при подземной отработке запасов рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА».

Ключевые слова: водоносный комплекс, предохранительный целик, напряженно-деформированное состояние, оседание, смещение.

PREDICTIVE ESTIMATE OF STRESS–STRAIN STATE OF SAFETY PILLAR UNDER AQUIFER

Vasily D. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Head of Laboratory for Diagnostics of Mechanical Condition of Rocks, tel. (383)217-05-41, e-mail vbar@misd.nsc.ru

Lidia N. Gakhova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Laboratory for Diagnostics of Mechanical Condition of Rocks, tel. (383)217-03-37, e-mail: gahoval@mail.ru

Based on numerical modeling and in situ observations, the authors have made predictive estimate of the stress–strain state in the safety pillar under aquifer in Internatsionaly Ore Mine of ALROSA Co.

Key words: aquifer, safety pillar, stress–strain state, subsidence, displacement.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке института ЯКУТНИПРОАЛМАЗ АК «АЛРОСА»

Для защиты подземных горных выработок от прорыва воды из несдренированного метегеро-ичерского водоносного комплекса (МИВК) (отм. +70м÷-130 м) при отработке подкарьерных запасов рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА» предусмотрено оставление рудного предохранительного целика (рис. 1). Первоначально граница безопасной глубины ведения очистных работ определена расчетами НТЦ «НОВОТЭК» (г. Белгород) и располагалась на отм. -190 м. В 2005 г. выемкой слоя N20 блока №5 (а.о. кровли слоя: -195м) сформирован рудный целик, фактическая мощность которого составила 65 м. Практически весь блок был отработан в нисходящем порядке. Для обеспечения безопасных условий отработки запасов блока был реализован проект гидрогеомеханического мониторинга [1, 2].

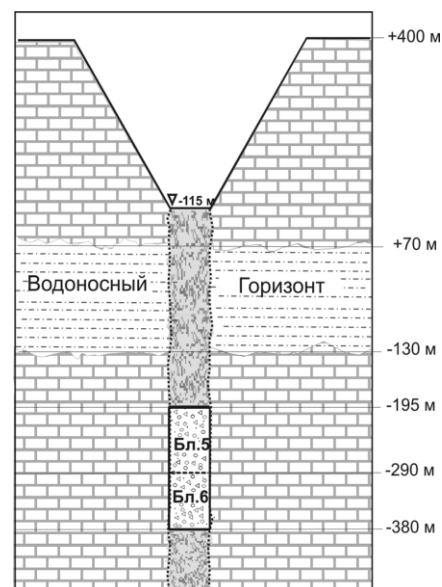


Рис. 1. Вертикальное сечение рудного тела

В настоящее время обоснован перенос границы безопасного ведения очистных работ с отм. -190 м на отм. -150 м с последующей отработкой запасов нижней части блока №4, расположенной под этой границей. Вследствие мер по водоотведению подошва водосливного комплекса (подошва МИВК) достигла отметки -97 м.

Целью данной работы является оценка изменения геомеханических параметров рудного предохранительного целика, обеспечивающего безопасные условия отработки месторождения.

Проведены численные расчеты по оценке ожидаемых изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне влияния очистных работ при выемки запасов слоев 8–9 блока №4. Расчеты выполнялись на основе решения плоской задачи теории упругости методом граничных интегральных уравнений с учетом влияния на НДС отработанного и заложеного нижележащего блока № 5. Поскольку расчеты выполнялись в плоской постановке, результаты следует считать оценкой сверху.

Из-за отсутствия экспериментальных данных о напряженном состоянии нетронутого массива параметры естественного поля напряжений приняты следующие: $\sigma_z^0 = -\gamma H$, $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = -\lambda \gamma H$, где σ_z^0 – вертикальная, σ_x^0 , σ_y^0 – горизонтальные компоненты напряжений, γ – объемный вес пород, H – глубина разработки, λ - коэффициент бокового распора; из-за доминирующего преобладания галита в составе вмещающих пород принято – $\lambda=1,0$. Модуль упругости $E = 10$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$, угол внутреннего трения $\varphi=30^\circ$, сцепление $C=1$ МПа. В нетронутом массиве на отметках нижней части блока №4 $\sigma_z^0 = \sigma_y^0 = \sigma_x^0 = 14$ МПа. Предельная величина сдвигающих напряжений рудного массива, превышение которой приводит к неупругому деформированию пород, для

условий опытно-промышленного блока (блок №6) рудника «Интернациональный» принята $\sigma_{сд}^{\kappa} = 4$ МПа [3, 4].

Графики изолиний горизонтальных (σ_x) и вертикальных (σ_z) напряжений (рис. 2), а также зон неупругих деформаций под МИВК после отработки и закладки блока №5 приведены для сравнительной оценки изменений НДС вмещающего и породного массивов нижней части блока №4 в процессе отработки слоев 9→8. После доработки нижней части блока №4 в отм. -159 ÷ -195 м картина НДС будет аналогична приведенной на рис. 2 (после отработки блока №5) с незначительным уменьшением параметров НДС.

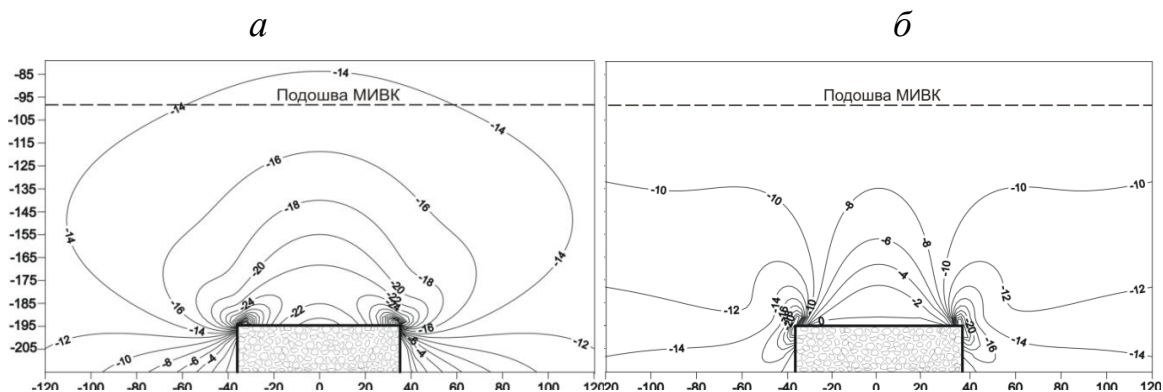


Рис. 2. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) напряжения (МПа) массива под МИВК после отработки и закладки блока № 5

Отработка слоя 9, а затем и слоя 8, приводит к формированию потолочины, изменение НДС которой отражено на рис. 3,4. Градиент горизонтальных напряжений в центральной части потолочины (-28 ÷ -14 МПа после отработки слоя 9) с понижением горных работ в нижней части блока №4 изменяется: -29 ÷ -18 МПа после отработки слоев 9→8 (3а, 4а). При этом потолочина остается разгруженной от вертикальных напряжений (см. рис. 3б, 4б).

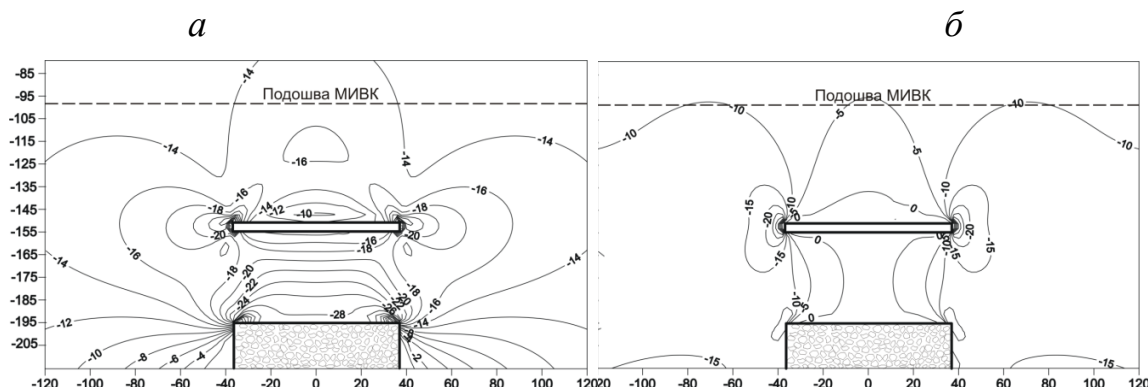


Рис. 3. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) напряжения (МПа) массива под МИВК после отработки слоя 9 №4

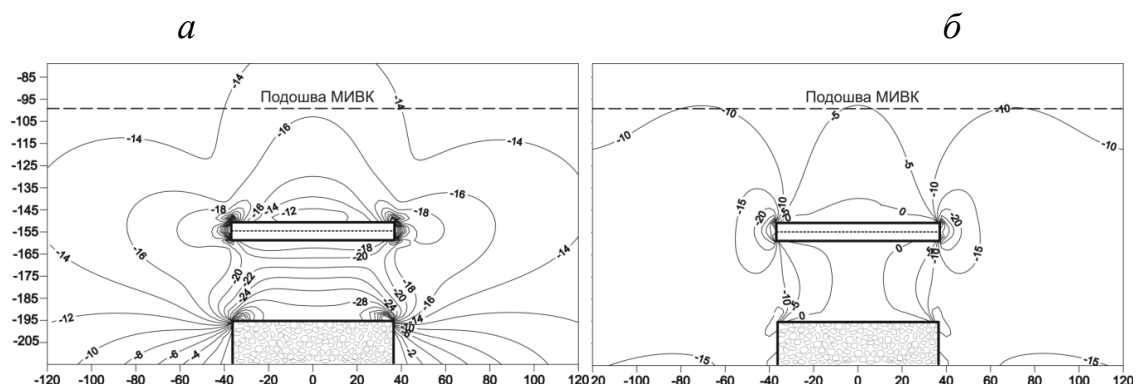


Рис. 4. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) напряжения (МПа) массива под МИВК после отработки слоев 9→8 блока №4

Зона неупругого деформирования, формируемая в кровле блока №4, удалена вглубь массива на глубину до 20 м (рис. 5). После отработки слоев 9 и 8 область неупругого деформирования занимает большую часть потолочины (см. рис. 5б, в). Верхняя граница зоны запредельного деформирования в кровле слоев 9→8 достигает отм.-125 м, что на 28 м ниже отметки подошвы МИВК (-97м).

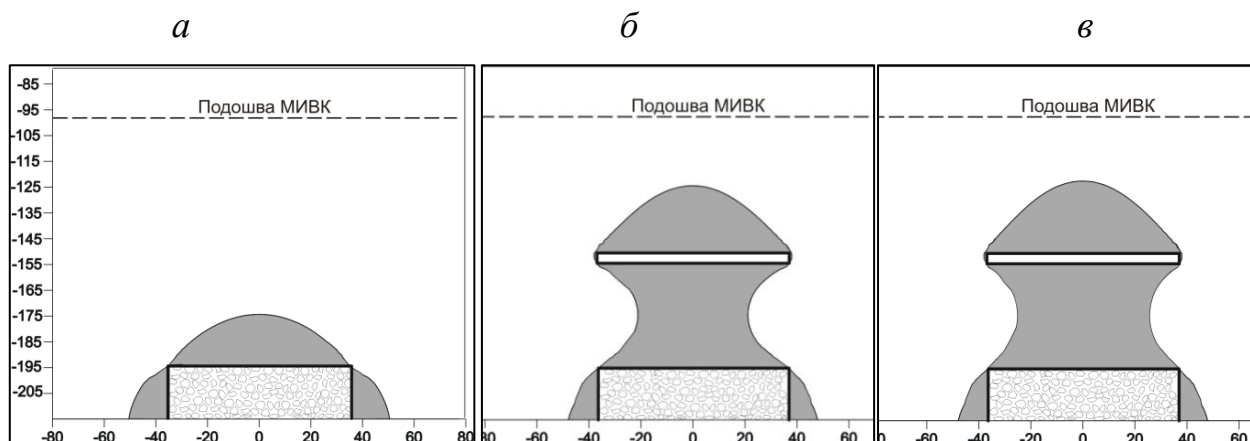


Рис. 5. Зоны неупругих деформаций массива в кровле отработанного блока №5: а – после доработки и закладки блока N 5; б – после отработки разрезного слоя 9 блока 4; в – после отработки слоев 9→8 блока №4

Для анализа смещений массива под МИВК в горизонтальном (U_x) и вертикальном (U_z) направлениях в процессе отработки нижней части блока №4 приведем графики изолиний, изображенные на рис. 6. На рис. 7 представлены графики оседаний кровли слоя 9 на различных этапах выемки запасов блока №4.

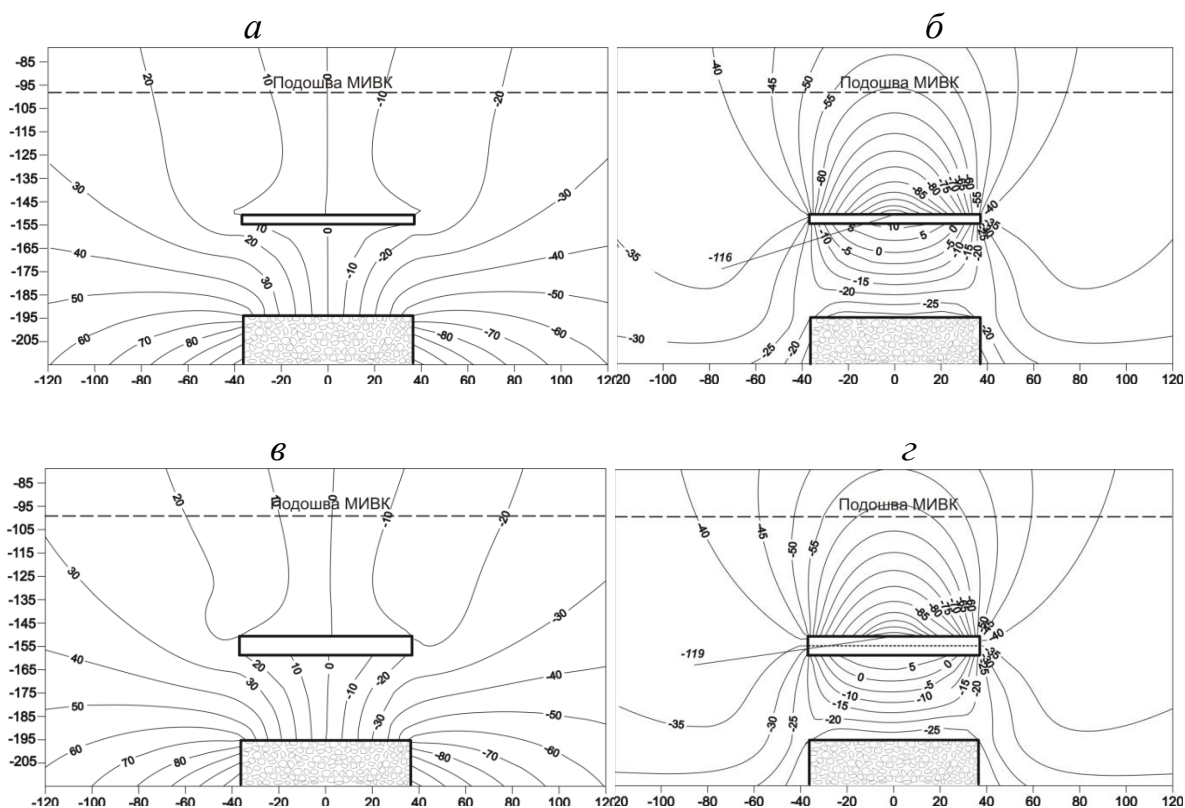


Рис. 6. Смещения массива (мм) под МИВК в горизонтальном (а, в) и вертикальном (б, г) направлениях после отработки слоя 9 (а,б) и слоев 9 → блока №4

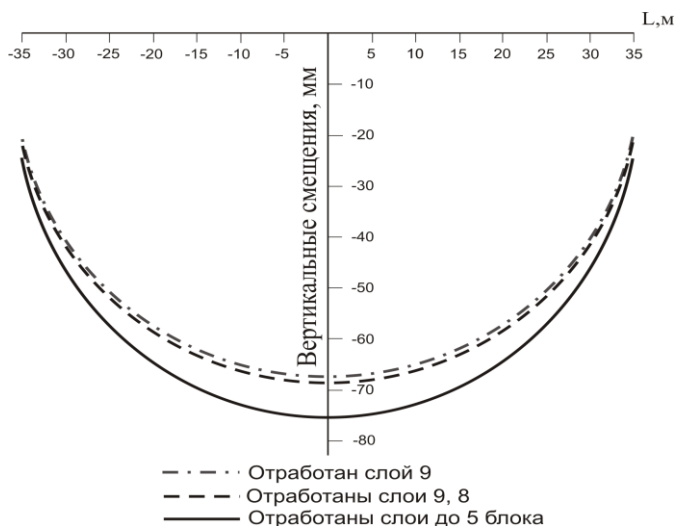


Рис. 8. Оседание кровли слоя 9 при отработке слоев 9→8 и полной доработке нижней части блока №4 (до отн. -195 м)

Максимальные упругие смещения в горизонтальном направлении в кровле слоя 9 относительно оси трубки наблюдаются на фланге и не превосходят 10 мм (рис. 6а). Максимальное упругое оседание кровли слоя 9 произойдет при его отработке и достигает -66 мм (рис. 7). Понижение горных работ приводит к приращению оседаний кровли слоя 9. После полной доработки слоев до блока №5 оседание кровли достигнет -75 мм (рис. 7).

В заключение необходимо отметить следующее. После отработки слоев 9 и 8 область неупругого деформирования занимает большую часть потолочины нижележащей

толщи рудного массива. Верхняя граница зоны запредельного неупругого деформирования в кровле слоя 9 (без учета её развития во времени) достигает отм. -125 м, что на 28 м ниже отметки подошвы водосливного комплекса (-97 м).

Максимальное упругое оседание кровли блока №4 в слое 9 при доработке запасов до блока №5 увеличится до 75 мм. Необходимо отметить, что фактические смещения в горизонтальном и вертикальном направлениях будут превышать указанные значения из-за наличия зоны неупругого состояния рудного массива в кровле слоя 9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барышников В.Д., Барышников Д.В. Геомеханический контроль предохранительного целика под водоносным горизонтом / Proceedings of the Vth International Geomechanics Conference 18-21 June 2012, – Publ.: International House of Scientists «Fr.J.Curie», Varna, Bulgaria.
2. Барышников В.Д., Барышников Д.В. Мониторинг сдвижения закладочного массива при слоевой нисходящей системе разработки / материалы VI междунар. конф. «Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности»: Алматы, Казахстан, 2013.- С 137 – 142.
3. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. – Новосибирск. – 2012. – №4.
4. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Влияние частичного затопления карьера «Айхал» на напряженно-деформированное состояние рудной потолочины // ФТПРПИ. – Новосибирск. – 2013. – №4. – С. 23 – 31.

© В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова, 2014

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ВОДОВОДА В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

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, тел. (383)217-03-37, e-mail: gahoval@mail.ru

По результатам численного моделирования выполнена оценка напряженного состояния турбинного сталежелезобетонного водовода гидротехнического сооружения при размещении его непосредственно в теле сооружения и на его поверхности. Показано, что в климатических условиях Сибири по условиям термонапряженного состояния размещение водовода в бетоне сооружения более эффективно.

Ключевые слова: сталежелезобетонный водовод, численное моделирование, квазистатическая термоупругость, напряженное состояние.

THERMAL STRESS OF MULTI-LAYER STEEL-AND-CONCRETE CONDUIT IN THE STRUCTURE OF WATERWORKS

Lidia N. Gakhova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Laboratory for Diagnostics of Mechanical Condition of Rocks, tel. (383)217 0337, e-mail: gahoval@mail.ru

Based on numerical modeling, the author assesses stress state of steel-and-concrete power conduit included in the structure of waterworks in cases when the conduit is embedded in concrete and placed on the waterworks surface. It is shown in the article that embedding the conduit in concrete is more efficient in climatic conditions of Siberia.

Key words: steel-and-concrete conduit, numerical modeling, quasi-static thermoelasticity, stress state.

Необходимость учета температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние (НДС) инженерных сооружений возникает при эксплуатации их в условиях теплообмена с окружающими массивами, больших амплитуд сезонных колебаний температуры воздуха и в других аналогичных случаях. Следствием этих изменений является перераспределение напряжений как в самих конструктивных элементах, так и между ними.

Для определения НДС таких систем с использованием метода граничных интегральных уравнений разработаны варианты решения задач термоупругости в квазистатической постановке [1, 2]. Сравнение полученных результатов с данными натурных наблюдений позволило адаптировать комплекс программных средств к условиям конструктивных элементов Саяно-Шушенской ГЭС [3].

Исследовалось НДС сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС, размещенного на поверхности низовой грани плотины и в её бетоне (рис. 1). Железобетонный трубопровод кругового сечения представляет собой многослойное кольцо, состоящее из стальной оболочки и железобетонной обделки с двумя слоями кольцевой арматуры [3 - 5]. Параметры и конструктивные особенности водовода, размещенного в бетоне низовой грани, аналогичны водоводу СШ ГЭС, за исключением его внешнего бетонного кольца: расстояние от внешнего арматурного кольца водовода до низовой грани – 1.5 м. Толщина арматурного кольца принята равной диаметру арматурных стержней. Предполагалось, что металл облицовки, бетон и арматурные кольца – изотропные, линейно деформируемые в упругости материалы. Расчеты выполнены с учетом трещиноватости внутренних бетонных колец водовода. При размещении водовода в бетоне низовой грани для внешнего бетонного массива рассматривалось два варианта: бетон – изотропного, линейно-деформируемый материал (I вариант) и бетон – трещиноватый массив (II вариант).

Задачи термоупругости решалась в квазистатической постановке с шагом 15 сут.

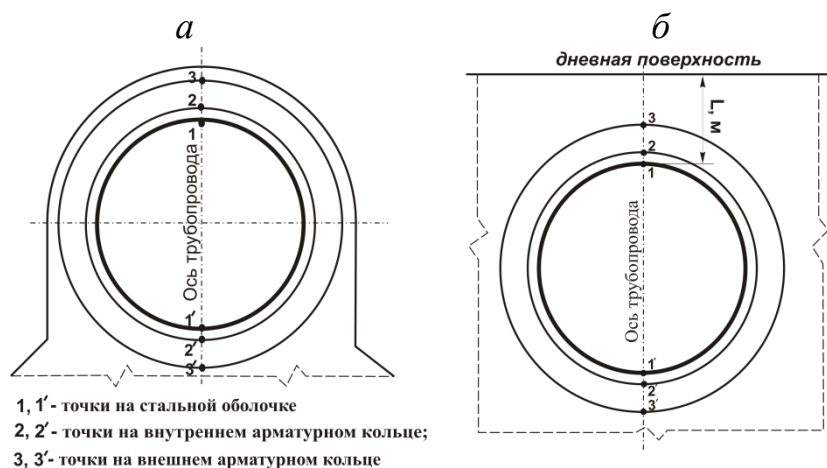


Рис. 1. Схема трубопровода:

а - размещенного на низовой грани плотины; б - в бетонном массиве низовой грани

В эксплуатационный период НДС водовода определяется гидростатическими нагрузками, носящими циклический характер, сезонными изменениями температуры наружного воздуха и воды в водоводе, НДС низовой грани плотины, уровнем напряжений, сформированных в процессе возведения сооружения и другими факторами.

Так как низовая грань плотины сжата в продольном направлении (вдоль водовода), то можно считать, что металлическая оболочка и арматура водовода также сжаты в этом направлении и не зависят от гидростатического давления в водоводе.

Напряженное состояние железобетонных водоводов носит циклический характер и формируется в условиях сезонного колебания температуры воды на пороге водоприемника и температуры наружного воздуха (рис. 2). В табл. 1 указаны необходимые для расчетов физические параметры. Для оценки влияния температурного режима на напряженное состояние железобетонного водовода выполнены расчеты НДС конструктивных элементов водовода, протекающего в условиях нестационарного теплообмена.

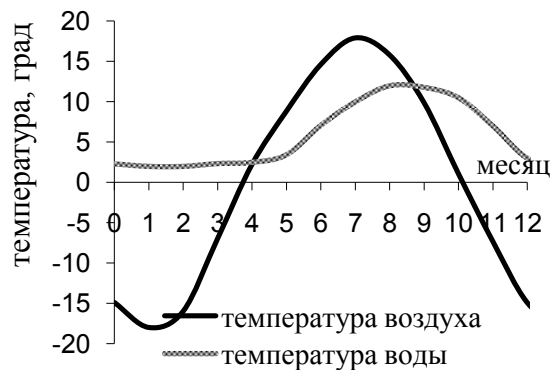


Рис. 2. Температура воды на пороге водоприемника и сезонное колебание температура воздуха в районе СШ ГЭС

Условия сопряжения тепловых потоков на границе твердого тела с жидкостью и воздухом задаются через коэффициенты теплоотдачи: теплоотдача воздуха $\alpha_1=6$ Вт/($\text{м}^2\cdot\text{град}$), теплоотдача воды, движущейся по трубам $\alpha_2=600$ Вт/($\text{м}^2\cdot\text{град}$), теплообмен «воздух-бетон» $h_1= \alpha_1/k = 3,45$ 1/м, теплообмен «вода – сталь» $h_2= \alpha_2/k = 17,14$ 1/м.

Таблица 1

Физико-механические свойства конструктивных элементов сталежелезобетонных водоводов

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 a , м ² /сек	$7.32 \cdot 10^{-6}$	$0.54 \cdot 10^{-6}$	$0.84 \cdot 10^{-6}$
теплоотдачи α_1 , Вт/($\text{м}^2\cdot\text{град}$)	3.51	0.87	2.1

Динамика температурного поля трубопровода вдоль осевой линии от внутренней поверхности стальной оболочки до дневной поверхности (рис. 1а) при его размещении на низовой грани и в бетоне приведена на рис. 3. Результаты расчетов свидетельствуют о более благоприятном температурном режиме, формирующемся в поперечном сечении водовода, расположенного в бетонном массиве по сравнению с водоводом, вынесенным на низовую грань. Во внутренних элементах (оболочка и внутреннее арматурное кольцо) температурные режимы различаются

не более, чем на 1°C . Приращение температуры наружного арматурного слоя различаются существенно: максимальное приращение температуры наблюдается в случае размещения водовода на низовой грани – около 30°C (рис. 3а); в бетоне низовой грани – не более 10°C (рис. 3б).

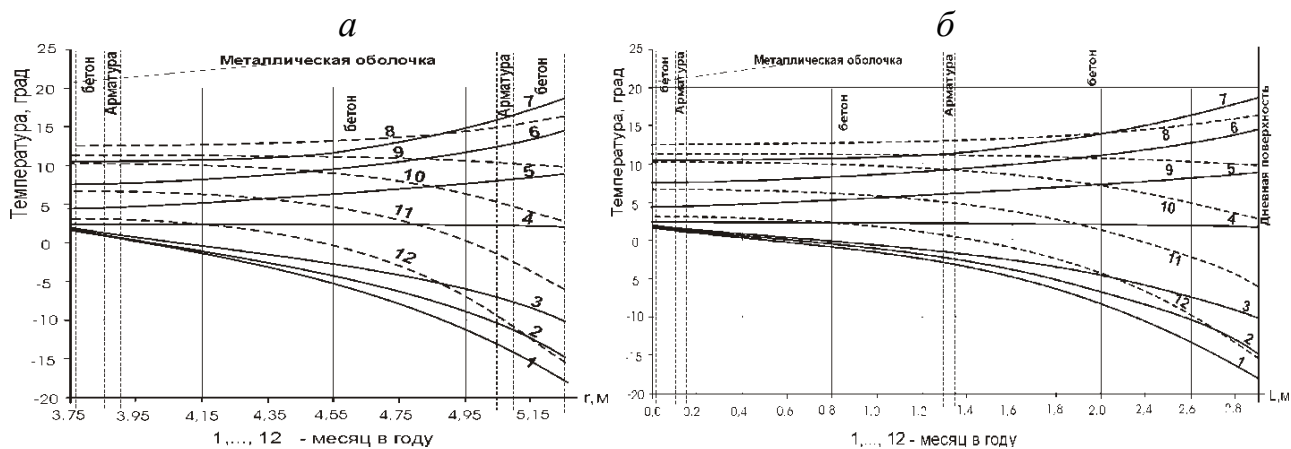


Рис. 3. Динамика температурного поля в водоводе при изменении температуры наружного воздуха от $-17,3^{\circ}\text{C}$ до $+17,9^{\circ}\text{C}$ и воды в водоводе от $+2,0^{\circ}\text{C}$ до $12,4^{\circ}\text{C}$:

а - водовод размещен на поверхности низовой грани;

б – водовод размещен в бетоне низовой грани

В табл. 2 приведены максимальные тангенциальные напряжения конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода (σ_{θ} , МПа) с учетом температурных воздействий, работы бетона низовой грани, как изотропного, линейно-деформируемого материала (I вариант) и трещинообразования в бетоне (II вариант) со стороны дневной поверхности.

Таблица 2

Максимальные тангенциальные напряжения (МПа)
конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода

Номер кольца	Конструктивных элемент	Водовод на поверхности низовой грани	Водовод в бетоне низовой грани	
			I вариант	II вариант
1	Металлич. оболочка:	точка 1	163,3	136,2
		точка 1'	132,4	120,2
2	Внутренняя арматура*:	точка 2	82,1	62,4
		точка 2'	64,8	52,0
3	Внешняя арматура*:	точка 1	107,2	54,0
		точка 1'	87,0	54,1

* Напряжения приведены непосредственно в арматуре

Напряженное состояние оболочек сталежелезобетонного водовода, расположенного в теле плотины, характеризуются уменьшением максимальных растягивающих тангенциальных напряжений во всех конструктивных элементах по сравнению с водоводом, вынесенным на низовую грань плотины:

а) в металлической оболочке: на 18% в точке 1 и на 9,2% в точке 1' в расчетах варианта II и на 22% и 10,2% в соответствующих точках в расчетах варианта I;

б) во внутренней арматуре: на 15 % в точке 2, на 11% в точке 2' в первом варианте и на 31% и 23% во втором варианте;

в) во внешней арматуре – на 32% в точке 3, на 31% в точке 3' в первом варианте, вдвое и на 60% больше в соответствующих точках во втором варианте.

Таким образом, с точки зрения влияния температурных воздействий на НДС конструктивных элементов турбинных водоводов, обеспечения их монолитности и долговечности, в практике строительства высоконапорных сооружений в условиях Сибири расположение водовода в теле плотины должно быть более эффективным.

Приведенные выше результаты анализа НДС многослойного материала свидетельствуют о возможности использования комплекса программ для решения задач термоупругости в квазистатической постановке, разработанного на основе метода граничных интегральных уравнений, в расчетах НДС массива горных пород с пройденной в нем выработкой, закрепленной композитным материалом. Решение прикладных задач в конкретных ситуациях (например, влияние проветривания выработок на значительных глубинах разработки месторождений Севера) позволит получить количественную оценку температурных напряжений массива вблизи выработок.

Для более точной постановки задач, адекватно отражающих реальную ситуацию, необходимо привлечь экспериментальные данные или полученные на их основе эмпирические зависимости. Это относится к заданию распределения температуры на контурах, потоку тепла и исходным напряжениям в массиве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gakhova L.N. Solving problems of stressed states of a mass having block structure / *Geocology and Computers*. — Moscow, Rotterdam: Balkema. — 2000.
2. Гахова Л.Н. Температурные напряжения в кусочно-однородном массиве / Труды IX междунар. конф. «ГЕО-Сибирь-2013», т. 2. — Новосибирск: СГГА, 2013.
3. Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Расчет напряжений в сталежелезобетонных турбинных водоводах методом граничных интегральных уравнений // *Известия ВУЗов. Строительство*. — 2010. — № 8.
4. Гахова Л.Н. Напряженное состояние многослойных железобетонных конструкций с учетом трещинообразования в бетоне / Труды 2-ой Российско-Китайской научной конф. «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах»: — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
5. Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Оценка напряженного состояния турбинных водоводов методом граничных интегральных уравнений // *Известия ВУЗов. Строительство*. — 2011. — № 8-9.

© Л. Н. Гахова, 2014

УСТРОЙСТВО НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ЕГО СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Андрей Владимирович Патутин

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

Татьяна Викторовна Шилова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)335-96-42, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Сергей Владимирович Сердюков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией физических методов воздействия на массив горных пород, тел. (383)3359642, e-mail: ss3032@yandex.ru

Приведены результаты стендовых испытаний разработанного образца оборудования для гидроразрыва угольных пластов. В ходе проведения экспериментов проверена работа двух независимых гидравлических систем скважинного устройства под давлением. Установлено, что падение давления в пакерах и интервале разрыва в течение 60 минут не превышает погрешности измерений манометрами; герметичность межпакерного интервала не нарушается при всех режимах работы оборудования.

Ключевые слова: направленный гидроразрыв, дегазация, метан угольных пластов, измерение напряжений.

DIRECTIONAL HYDRAULIC FRACTURING EQUIPMENT AND ITS STAND TEST

Andrey V. Patutin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Tatiana V. Shilova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)335-96-42, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Sergey V. Serdyukov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Physical Treatment of Rock Mass, tel. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

The results of stand testing of hydraulic fracturing equipment for coal seams are presented. Two independent pressure lines were checked to ensure proper operation of the downhole tool. It has been found that the pressure drop in two packers and in the fracturing interval within 60 minutes does not exceed the measurement error of gauges; the tightness of isolated interval between two packers is not compromised at all modes of operation.

Key words: directional hydraulic fracturing, degassing, coal bed methane, stress measurements.

Способ гидравлического разрыва широко используется в горном деле для интенсификации дегазации угольных пластов, разгрузки массива от сжимающих напряжений, обрушения горных пород за счет формирования направленных плоскостей ослабления, оценки напряженно-деформированного состояния[1, 2].

В ИГД СО РАН создан экспериментальный образец оборудования для проведения гидроразрыва угольных пластов, который включает в себя устройства разрыва и направленного нагружения стенок скважины, трубопровод, устройство определения ориентации следа трещины, систему управления.

На рис. 1 представлено устройство разрыва, которое состоит из нижнего и верхнего пакеров, инжекторного пакера, а также из инжектора и деталей удлинителя.

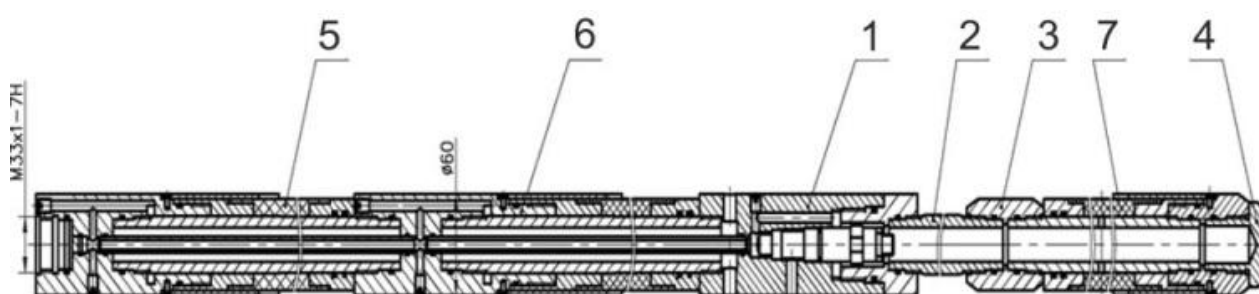


Рис. 1. Общий вид устройства разрыва:

- 1 — инжектор, 2 — удлинитель, 3 — муфта удлинителя, 4 — заглушка,
5 — верхний пакер, 6 — инжекторный пакер, 7 — нижний пакер

Внутренний канал верхнего пакера предназначен для подачи гидравлического масла или азота под давлением до 35 МПа в узлы устройства разрыва, расположенные дальше от устья скважины. Кольцевой канал между внешней и внутренней трубами используется для подачи жидкости разрыва под давлением до 25 МПа в интервал разрыва (межпакерный интервал) через инжектор. Нижний пакер содержит только одну трубу, внутреннее пространство которой соединено через отверстие с пакерной оболочкой.

Конструкция пакеров обеспечивает возможность последовательного соединения нижних или верхних секций пакеров между собой длиной до 4,5 м. Для наращивания длины верхнего пакера в качестве внешних (ближних к устью скважины) секций используют верхние пакеры (один и более), а в качестве внутренней секции, соединенной с инжектором — инжекторный пакер (только один). Если используется простые односекционные пакеры, то в качестве внешнего пакера используется только инжекторный пакер. При соединении нижних пакеров в одну систему заглушка устанавливается на нижней секции последнего пакера.

Устройство направленного нагружения стенок скважины (скважинный домкрат) применяется для предварительного создания иницирующей продольной трещины в требуемом направлении и может быть применено как отдельно, так и в составе устройства разрыва. В последнем случае его размещают в середине межпакерного интервала между секциями удлинителя вместо одной из его соединительных муфт.

Скважинный трубопровод имеет коаксиальную двухлинейную конструкцию. Внутренняя линия с проходным диаметром 6 мм служит для подачи гидравлического масла (азота) в пакеры и выдерживает давление 45 МПа. Внешняя линия, сформированная межтрубным пространством трубопровода, имеет условный диаметр проходного сечения 18 мм и служит для подачи жидкости разрыва под давлением до 35 МПа. В случае необходимости использования сложных двухкомпонентных составов, требующих смешения непосредственно в устройстве разрыва, возможно подключение пакеров к отдельной гибкой линии высокого давления. Трубопровод выполнен в виде отдельных однотипных секций длиной 2 м и массой 4,4 кг каждая.

Импрессионный пакер представляет собой дополнительное устройство, предназначенное для регистрации трещин (в т.ч. трещины гидроразрыва) на стенке скважины. В качестве чувствительного элемента использована пакерная оболочка с дополнительным слоем мягкой невулканизированной резины толщиной несколько миллиметров, что позволяет определить направленность формируемых трещин по отпечатку.

Система управления экспериментального образца оборудования состоит из блока управления подачей жидкости гидроразрыва и гидравлического масла (азота) в пакеры при выполнении гидроразрыва. Особенностью системы является возможность подключения пневмогидроаккумуляторов для обеспечения высокого темпа нагнетания жидкости разрыва даже при работе с малопроизводительными насосами. Конструкция оборудования обеспечивает возможность работы с насосом УНИ–1 (УНР–2), применяемым в шахтных условиях для выполнения гидроразрывов на водной основе. Общий вид устройства разрыва в ходе стендовых испытаний приведен на рис. 2.

Стендовые испытания включали проверку следующих элементов:

- 1) герметичность двух независимых гидравлических линий подачи для пакеров и интервала разрыва;
- 2) герметичность подсистемы интервала разрыва при различной разнице давлений с пакерной подсистемой.

Устройство разрыва устанавливали в стальную трубу длиной 2 м и подключали к системе управления из комплекта объекта испытания. Система управления подключалась к насосу высокого давления с ручным приводом, обеспечивающего давление на выходе до 60 МПа.

С помощью указанного насоса в межпакерное пространство подавалось гидравлическое масло под давлением 12 МПа; давление в пакерах составляло 15 МПа. Измерение давлений осуществляется образцовыми манометрами МО250–600 с верхним пределом 60 МПа и погрешностью измерений $\pm 0,1$ МПа.



Рис. 2. Устройство разрыва в ходе стендовых испытаний.

После установления указанных давлений обе линии перекрывались соответствующими вентилями системы управления и в таком состоянии выдерживались в течение 1 часа с периодически снятием раз в 10 мин показателей манометров. Изменение давлений в ходе испытаний не превышало погрешности измерений манометрами. Таким образом, скважинное оборудование комплекса ЭОО выдержало испытания на герметичность под давлением.

Испытания герметичности подсистемы интервала разрыва при различной разнице давлений с пакерной подсистемой проводились по следующей схеме.

С помощью ручного насоса в интервал разрыва подавали гидравлическое масло под давлением. В первой серии испытаний в интервале разрыва устанавливали давление 10 МПа, во второй — 7 МПа. В каждой серии испытаний давление в пакерных элементах было выше на 3, 4, 5 МПа, чем в интервале разрыва. Давление измеряли с помощью манометров в начале и в конце каждого испытания с погрешностью $\pm 0,1$ МПа. В результате испытаний установлено, что герметичность межпакерного интервала не нарушается и находится в пределах погрешностей измерений.

Проведенные стендовые испытания показали, что разработанный образец оборудования может быть использован для проведения операции гидроразрыва в шахтных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №14-05-00629)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин В. И., Курленя М. В. Создание оборудования для дегазации угольных пластов на принципе гидроразрыва горных пород // Уголь. – 2011. – № 10 (1027). – С. 34–39.
2. Fairhurst C. Measurement of in situ rock stresses with particular reference to hydraulic fracturing // Rock Mechanics and Engineering Geology. – 1964. – Vol. 2. – P. 129–147.

© А. В. Патутин, Т. В. Шилова, С. В. Сердюков, 2014

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ С ОБРАТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОЧИСТНОГО АГЕНТА

Борис Николаевич Смоляницкий

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)217-07-14, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией подземной строительной геотехники и геотехнологий, тел. (383)220-12-11, e-mail: dissovet@misd.nsc.ru

Екатерина Владимировна Рубцова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-09-30, e-mail: rubth@misd.nsc.ru

Рассмотрена технологическая схема бурения скважин с обратной продувкой и «вакуумным» транспортированием разрушенного грунта. Предложена методика расчета основных параметров буровой установки, обеспечивающих эффективность процесса транспортирования разрушенного грунта при обратной продувке.

Ключевые слова: бурение, скважина, трубопровод, транспортирование, грунтовая порция, перепад давления.

DETERMINATION OF BASIC PARAMETERS OF A DRILL RIG WITH REVERSE SCAVENGING

Boris N. Smolyanitsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Head of Mining and Construction Geotechnics Department, tel. (383)217-07-14, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Underground Construction Geotechnics and Geotechnology, tel. (383)217-01-33, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Ekaterina V. Rubtsova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-09-30, e-mail: rubth@misd.nsc.ru

The article presents the hole drilling process layout with reverse scavenging and “vacuum” removal of broken soil. The authors propose the calculation procedure for basic parameters of a drill rig to ensure effective removal of broken soil in reverse scavenging.

Key words: drilling, hole, pipeline, transportation, soil batch, differential head.

Наиболее широко используемым способом сооружения протяженных горизонтальных скважин в грунтовом массиве, как за рубежом, так и в РФ, является горизонтальное направленное бурение. Одной из инновационных разработок в этом направлении является предложенная в ИГД СО РАН технология "сухого" бурения комбинированным способом с транспортированием разрушенного грунта сжатым воздухом по вращающемуся трубопроводу [1 – 3].

Рассмотрим технологическую схему бурения скважин с обратной циркуляцией очистного агента, основанную на так называемом "вакуумном транспортировании". Суть предлагаемой технологии заключается в том, что воздушный поток в трубопроводе создается не за счет повышения давления в начале трубопровода, а за счет понижения давления в конце трубопровода. Приток воздуха на входе в трубопровод происходит из атмосферы (рис. 1). Транспортным каналом для удаления разрушенного грунта является внутренняя полость буровой колонны. При этом воздух в затрубном пространстве между скважиной и буровой колонной находится при атмосферном давлении, а разрежение на выходе транспортного канала создается при помощи промышленного пылесоса или воздуходувки.

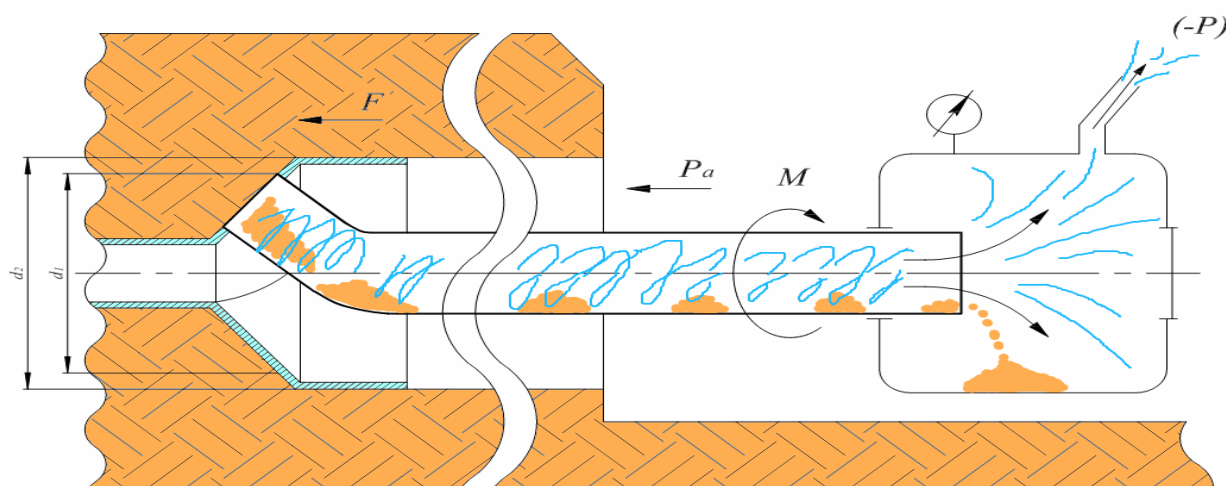


Рис. 1. Технологическая схема бурения скважин с обратной продувкой и «вакуумным» транспортированием разрушенного грунта

Достоинством предложенной технологической схемы является отсутствие двойной колонны, что значительно упрощает технологический процесс и повышается эффективность управления траекторией скважины. К недостатку данной схемы можно отнести ограниченный перепад давления на входе и выходе транспортного канала. Однако, как показали эксперименты, перепады давления, создаваемые промышленными пылесосами (0,25 – 0,3 МПа) и воздуходувками (до 0,5 МПа), позволяют создать работоспособную транспортную систему.

При исследовании работы пневмотранспортной системы установлено, что давление воздуха, необходимое для транспортирования грунтового поршня, зависит, главным образом, от массы грунтовой порции и диаметра трубопровода [4]. Результаты расчетов показывают, что для транспортирования грунтовых порций по трубопроводу диаметром 100 мм, который обеспечивает эффективное транспортирование грунта при бурении с прямой продувкой, необходимо давление воздуха перед грунтовой порцией согласовать с её массой (рис. 2, кривая 1). Так, например, при массе порции 10 кг необходимо создать перепад давления в пределах 0,2 – 0,25 МПа, что соответствует техническим возможностям промышленных пылесосов и воздуходувок. Однако при дальнейшем увеличении массы порции рост давления приобретает нелинейный характер и достигает величины 0,3 – 0,4 МПа уже при массе грунтового поршня 15 кг. Масса поршня около 30 кг является критической даже при работе с избыточным давлением, создаваемым компрессорами.

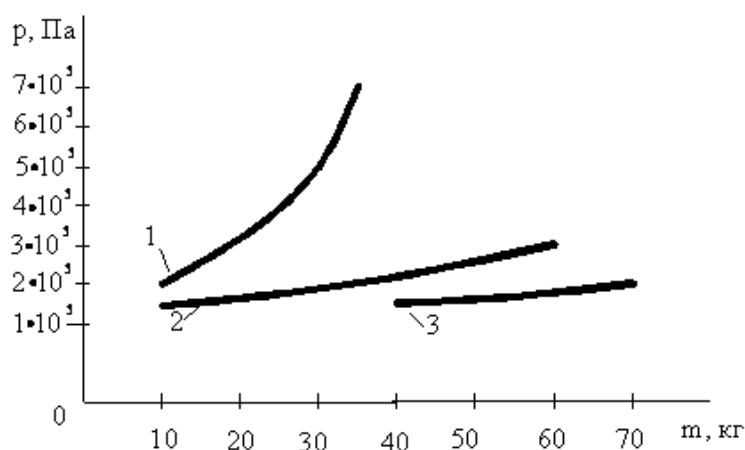


Рис. 2. Зависимость перепада давления от массы поршня для диаметров трубопровода: 0,1 м (1); 0,2 м (2); 0,3 м (3)

При увеличении диаметра трубопровода масса грунтовой порции в гораздо меньшей степени влияет на величину давления, требуемого для транспортирования поршня (рис. 2, кривые 2 и 3). Абсолютное значение максимального давления в трубопроводе диаметром 200 мм составляет 0,3 МПа при массе порции около 60 кг, при диаметре 300 мм давление еще меньше.

Таким образом, трубопровод диаметром 200 мм и более позволяет создать работоспособную магистраль для транспортирования разрушенного грунта при обратной продувке.

Однако следует отметить, что при увеличении диаметра трубопровода и неизменном расходе воздуха уменьшается скорость транспортирования грунтовых порций. Это повышает вероятность одновременного нахождения в трубопроводе двух и более транспортируемых порций, особенно при значительной

длине трубопровода. На рис. 3 приведена зависимость скорости движения грунтовой порции от диаметра трубопровода при различных значениях её массы, но при одинаковом расходе воздуха. Порции средней массы движутся со скоростью менее двух метров в секунду (кривая 3), что при значительной длине трубопровода может оказаться недостаточным и повлечет за собой аварийное закупоривание магистрали.

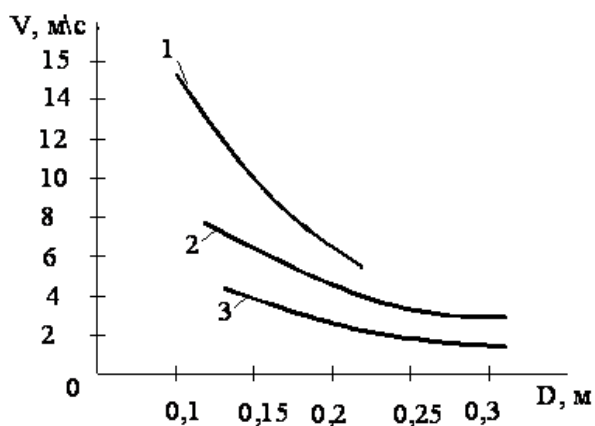


Рис. 3. Зависимость скорости движения грунтовой порции от диаметра трубопровода при массе: 10 кг (1); 20 кг (2); 40 кг (3)

Масса грунтовой порции, сформировавшейся в движущемся в транспортном канале поршне, зависит от скорости поступления грунта в трубопровод, определяемой такими параметрами, как диаметр сооружаемой скважины и скорость ее проходки. Масса грунта, разрушаемая в единицу времени, определяется из выражения:

$$m = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v \cdot \rho, \quad (1)$$

где D – диаметр скважин; v – скорость поступательного движения инструмента; ρ – плотность материала.

Одним из путей уменьшения сил сопротивления движению грунтовой порции является использование в качестве очистного агента воздушно-водяной смеси, которая, оседая на стенках трубопровода, образует смазывающую прослойку между грунтом и трубопроводом и приводит к уменьшению коэффициента трения. Тот же эффект достигается подбором материала трубопровода (например пластмассы).

На рис. 4 приведена расчетная зависимость давления от величины коэффициента трения грунтового поршня о стенки трубопровода при различных его диаметрах. Как видно из графиков, при диаметре транспортного канала более 160 мм изменение коэффициента трения не оказывает существенного влияния на величину давления. При уменьшении диаметра канала реакция модели на

изменение коэффициента трения возрастает. Если конструктивные и технологические решения позволяют снизить коэффициент трения до 0,4, то диаметр транспортного канала может быть уменьшен с 200 мм до 160 мм; при коэффициенте трения 0,3, соответственно, до 150 мм без потери эффективности процесса транспортирования.

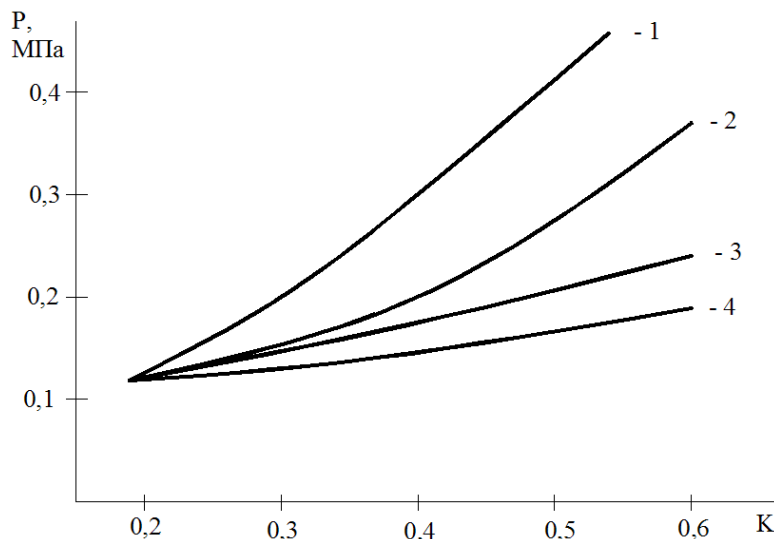


Рис. 4. Зависимость давления от коэффициента трения для трубопроводов диаметром: 0,15 м (1); 0,16 м (2); 0,18 м (3); 0,2 м (4)

Таким образом эффективность работы пневмотранспортной системы определяется значениями целого ряда перечисленных выше параметров. При этом многие из них взаимозависимы.

На основе вышеизложенного для определения основных параметров буровой установки с обратной циркуляцией очистного агента предлагается следующая методика:

- при известных технических данных источника воздушного потока (перепад давления и расход воздуха) в соответствии с зависимостью (рис. 2) выбирают диаметр трубопровода и назначают его длину;
- для выбранного диаметра по известным формулам газовой динамики, или в соответствии с зависимостью (рис. 3) определяют скорость воздушного потока в трубопроводе и время прохождения грунтовым поршнем всей длины трубопровода;
- оценивают количество грунта, поступившего в трубопровод за это время, по выражению (1).
- если полученная масса грунта, поступившего в трубопровод за время прохождения поршнем всей длины трубопровода, превышает массу грунтового поршня, принятую при выборе диаметра трубопровода, то повторяют расчет, последовательно корректируя параметры, принятые в качестве исходных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2344241 РФ. Способ бестраншейной прокладки коммуникаций в грунте (варианты) / Б.Б. Данилов, Б.Н. Смоляницкий // Бюл. изобрет. – 2009. – № 2.
2. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б. Создание нового бурового комплекса для проходки протяженных горизонтальных скважин с транспортированием разрушенного грунта сжатым воздухом // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 7. – С. 17–22.
3. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Рубцова Е.В. К расчету потерь давления во вращающемся шламопроводе буровой установки при проходке протяженных горизонтальных скважин в грунте // ГЕО-Сибирь – 2013. Том 2, Ч. 3: Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сб. матер. VIII Межд. научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь-2013». – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 93–98.
4. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б. Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин // ФТПРПИ. – 2012. – № 3. – С. 82–90.

© Б. Н. Смоляницкий, Б. Б. Данилов, Е. В. Рубцова, 2014

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ Л. А. ГАЛИНА В ПОСТАНОВКЕ КОШИ

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 научной работе, тел. (383) 335-97-50, 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 лаборатории разрушения горных пород, тел. (383)335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Рассматривается упругопластическая задача для выработки кругового сечения с заданными на ее границе смещениями. Для случаев полного и неполного охватов упругопластической границей контура выработки построено решение, не использующее данные на «бесконечности», позволяющее оценивать упругопластическое напряженное и деформированное состояния по данным на поверхности скважины и по свойствам среды.

Ключевые слова: напряжения, деформации, упругость, пластичность, упругопластическая граница, задача Коши.

GALIN'S PROBLEM IN THE CAUCHY FORMULATION

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Physics and Mathematics, Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ilgizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Rock Failure Laboratory, tel. (383)335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

The elastoplastic problem for a circular cross-section tunnel with the pre-set boundary displacements is under consideration. For the cases of incomplete and complete enveloping of the tunnel boundary by elastoplasticity, the authors construct the solution free of the data “at infinity”, which allows assessment of the elastoplastic stresses and strains based on the data obtained on well surface and by the properties of the medium.

Key words: stress, strain, elasticity, plasticity, elastoplastic boundary, Cauchy problem.

Известно, что около отверстий образуется зона повышенных напряжений. При достижении напряжениями некоторой заданной величины материал возле отверстия переходит в неупругое состояние. Основная задача – получить распределение напряжений, деформаций, перемещений в области неупругости, найти границу, отделяющую область неупругости от области упругости.

Решению этой проблемы посвящено множество работ [1-10].

Рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть в направлении оси z деформация отсутствует ($\varepsilon_z = 0$), а в плоскости xOy задано сечение выработки в виде кругового отверстия радиуса a (рис. 1).

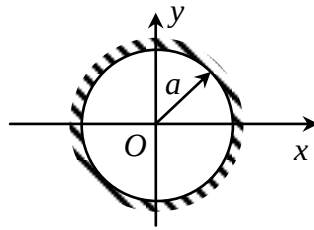


Рис. 1. Сечение выработки в виде кругового отверстия радиуса a

Пусть контур выработки свободен от напряжений:

$$\sigma_r|_{r=a} = 0, \quad \tau_{r\theta}|_{r=a} = 0. \quad (1)$$

Пусть в зоне пластических деформаций справедливо условие пластичности Треска:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + 4\tau_{r\varphi}^2} = 2\tau_s, \quad (\tau_s > 0), \quad (2)$$

где τ_s – предел упругости, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, $\sigma_2 = \sigma_z$, r, φ – полярные координаты, кроме того, выполняется условие соосности тензоров напряжений и деформаций:

$$\frac{2\tau_{r\varphi}}{\sigma_r - \sigma_\varphi} = \frac{2\varepsilon_{r\varphi}}{\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi}. \quad (3)$$

Пусть в направлении 2-го главного направления связь между напряжениями и деформациями – упругая, что соответствует известному предположению Хаара-Кармана для случая неполной пластичности [11]:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu}{E} \sigma_1 - \frac{\nu}{E} \sigma_3. \quad (4)$$

или, в силу условия $\varepsilon_z = 0$, выражению

$$\sigma_2 = \nu(\sigma_1 + \sigma_3). \quad (5)$$

Будем считать также, что исследуемый материал подчиняется закону упругого изменения объема:

$$\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)(1 - 2\nu)}{E} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Подставляя (5) в (6) и используя условие $\varepsilon_2 = 0$, находим

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)(1 - 2\nu)}{2G}, \quad (7)$$

где $2G = \frac{E}{1 + \nu}$ – модуль сдвига.

Далее, используя уравнения равновесия $\sigma_{ij,j} = 0$ и условие пластичности (2), имеем известную [12] гиперболическую систему уравнений с двумя характеристиками, совпадающими с направлениями действия максимального касательного напряжения, и двумя соотношениями на них, связывающими среднее напряжение и угол, задающий направление главных осей тензоров напряжений или деформаций (оси по условию (3) совпадают). Используя это обстоятельство и граничные условия (1), находим, что напряжения в области пластичности определяются однозначно выражениями

$$\sigma_r = 2\tau_s \ln \frac{r}{a}, \quad \sigma_\varphi = -2\tau_s + 2\tau_s \ln \frac{r}{a}, \quad \tau_{r\varphi} = 0. \quad (8)$$

При этом однако неизвестно до какой границы распространяется это решение (8). Чтобы определить ее, будем считать, что на границе выработки $r = a$ известно также распределение перемещений в виде:

$$u_r|_{r=a} = \alpha(\varphi), \quad u_\varphi|_{r=a} = \beta(\varphi), \quad (9)$$

где u_r – радиальное, u_φ – тангенциальное перемещение, φ – полярный угол, α, β – заданные функции.

Для отыскания смещений, а по ним деформаций $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_{r\varphi}$, перепишем условия (3), (7) в терминах перемещений u_r, u_φ . Имеем

$$\begin{cases} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} = - \left(1 - 2 \ln \frac{r}{a} \right) \frac{\tau_s (1 - 2\nu)}{G}, \\ \frac{\partial u_r}{r \partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Первое уравнение в (10) – по существу (7), второе уравнение – есть (3) при условии $\tau_{r\varphi} = 0$, определяющее равенство $\varepsilon_{r\varphi} = 0$.

Используя (10), получим сейчас уравнения отдельно для нахождения смещений u_r , u_φ соответственно. Возьмем от первого уравнения (10) производную $\partial / r \partial \varphi$, а от второго – производную $\partial / \partial r$ и вычтем из первого уравнения второе. В результате имеем

$$\frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} - \frac{u_\varphi}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} = 0. \quad (11)$$

Используя второе уравнение (10) (заменяем через него производную $\partial u_r / r \partial \varphi$), получаем отсюда

$$\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 u_\varphi}{r^2 \partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r^2} = 0. \quad (12)$$

В это уравнение не входит u_r , т.е. оно в чистом виде определяет смещение u_φ . Из (12) непосредственно следует принадлежность этого уравнения к гиперболическому типу с двумя вещественными характеристиками, совпадающими с логарифмическими спиралями. Следующий шаг – продифференцируем первое уравнение (10) по r , а от второго уравнения возьмем производную $\partial / r \partial \varphi$, после чего вычтем из первого уравнения второе. В результате находим

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{2\tau_s(1-2\nu)}{rG}. \quad (13)$$

Это – неоднородное дифференциальное уравнение 2-го порядка для определения смещения u_r . Его решение ищем в виде суммы общего решения однородного дифференциального уравнения и частного решения неоднородного. Частное решение неоднородного уравнения есть

$$u_r^{\text{частное}} = A r \ln r, \text{ где } A = \frac{\tau_s(1-2\nu)}{G}. \quad (14)$$

Однородное дифференциальное уравнение, соответствующее (13), имеет вид (12). Дальнейшая задача заключается в написании общего решения однородного дифференциального уравнения (12). Будем отыскивать решения (12) в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит от «своего» аргумента:

$$u_\varphi = f(r)g(\varphi). \quad (15)$$

Отметим, что принятию этого выбора благоприятствует вид граничных условий задачи (9). Подставляя (15) в (12), находим уравнение

$$\frac{g''(\varphi)}{g(\varphi)} = -\frac{r^2}{f} \left[f'' + \frac{1}{r} f'(r) - \frac{f}{r^2} \right]. \quad (16)$$

Здесь штрихами обозначаются производные. Слева в (16) стоит функция переменной φ , справа – переменной r . Очевидно, что $g(\varphi)$ должна быть периодической функцией угла φ (период должен совпадать с 2π). По этой причине положим

$$\frac{g''(\varphi)}{g(\varphi)} = -k^2,$$

где k – целое число.

Тогда функция $g(\varphi)$ определится как

$$g(\varphi) = C_1 \cos k\varphi + C_2 \sin k\varphi, \quad (17)$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные. Для определения функции f имеем уравнение

$$f'' + \frac{1}{r} f'(r) - \frac{(1-k^2)f}{r^2} = 0. \quad (18)$$

Будем искать решение (18) в виде

$$f = r^\lambda,$$

где λ – постоянное число.

Для λ из (18) получаем значения:

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{1-k^2}.$$

Если $k=0$, то

$$f = D_1 r + \frac{D_2}{r} \quad (D_1, D_2 - \text{константы}), \quad (19)$$

если $k = \pm 1$, то

$$f = D_1 \ln r + D_2, \quad (20)$$

в противном случае ($|k| \geq 2$) числа λ получаются комплексными (чисто мнимыми) и решение f записывается в виде:

$$f(r) = D_1 \cos \ln r^{\sqrt{k^2-1}} + D_2 \sin \ln r^{\sqrt{k^2-1}}, \quad (21)$$

потому, что

$$r^{i\sqrt{k^2-1}} = e^{\ln r^{i\sqrt{k^2-1}}} = e^{i\sqrt{k^2-1} \ln r}.$$

Аналогичное описание дается общему решению однородного дифференциального уравнения, соответствующего (13). Таким образом, показано, что по данным измерений смещений на поверхности выработки определяется напряженно-деформированное состояние в области пластических деформаций, включая упругопластическую границу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галин Л.А. Плоская упруго-пластическая задача. ПММ, 1946, Т. 10, в. 3
2. Ивлев Д.Д. Об определении перемещений в задаче Л.А. Галина. ПММ, 1957, Т. 2.
3. Эрлихман Ф.М. Определение перемещений в задаче Л.А. Галина. ДСС, Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1970, в. 4.
4. Аннин Б.Д. Одна плоская упруго-пластическая задача при экспоненциальном условии текучести. Инж. журнал МТТ, 1966, №3.
5. Савин Г.Н., Парасюк О.С. Влияние неоднородного напряженного поля на пластическую зону возле отверстия. ДАН УССР, 1948, №3.
6. Черепанов Г.П. К решению некоторых задач теории упругости и пластичности с неизвестной границей. ПММ, 1964, Т. 28, в. 1.
7. Остросаблин Н.И. Определение смещений в задаче Л.А. Галина. ДСС, Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1973, в. 14.
8. Быковцев Г.И., Цветков Ю.Д. Двумерная задача нагружения упруго-пластической плоскости, ослабленной отверстием. ПММ, 1987. Т. 51. №5. С. 314-322.
9. Чанышев А.И., Имамутдинов Д.И. Решение упруго - пластической задачи о протяженной цилиндрической выработке. ФТПРПИ. – 1988.-№5
10. Остросаблин Н.И. Плоское упругопластическое распределение напряжений около круговых отверстий. - Новосибирск: Наука, 1984. - 113 с.
11. Христианович С. А., Шемякин Е. И. К теории идеальной пластичности / Изв. АН СССР, МТТ . 1967. - № 5. - С 86-97.
12. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. — М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. Литературы, 1969. — 420с.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, 2014

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ СЖАТИЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

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 научной работе, тел. (383) 335-97-50, 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 лаборатории разрушения горных пород, тел. (383) 335-97-50, e-mail: belousova_o@ngs.ru

Неоднородность среды проявляется во многих компонентах и в том числе в значениях модулей Юнга, коэффициенте Пуассона, модуле сдвига. В работе решается вопрос о проявлении неоднородностей в таких простейших задачах как сжатие стержня в статической и динамической постановках. Исследуется вопрос: каков средний модуль Юнга в статике и каким он будет в случае прохождения волн?

Ключевые слова: неоднородность, сжатие, стержень, модуль Юнга, модуль сдвига, статика, динамика.

COMPUTATIONAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE EFFECT OF HETEROGENEITY ON THE STATIC AND DYNAMIC COMPRESSION OF A MEDIUM

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Physics and Mathematics, Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Olga E. Belousova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Researcher, Rock Failure Laboratory, tel. (383)335-97-50, e-mail: belousova_o@ngs.ru

Heterogeneity of a medium makes itself felt in many factors, including Young's modulus, Poisson's ratio and shear modulus. The article deals with the task of including the medium heterogeneity in the simplest problems on the static and dynamic compression of a rod. The question is: What is the average Young modulus in static condition and in case of wave propagation?

Key words: heterogeneity, compression, rod, Young's modulus, shear modulus, statics, dynamics.

Известно, что при однородном нагружении образцов различных сред на их поверхностях обнаруживаются линии или полосы локализации деформаций Чернова-Людерса. Линии определяются блочной структурой среды, блоки имеют ориентированные контактные площадки, имеют размеры. Существует

множество работ (например, [1-8]), посвященных описанию блочной структуры в теоретических построениях. В то же время появилось множество экспериментальных работ (например, [9,10]), основной результат которых - однородного деформирования однородно нагружаемых образцов не существует. Вывод из этих работ [1-10] таков: все тела неоднородны по строению, проявлениями неоднородностей являются блочная структура и неоднородный характер деформирования (даже при однородном нагружении).

Цель данной работы – определить как, например, «неоднородный» модуль Юнга скажется на макropоведении образца из такой среды при статическом и динамическом сжатии? Будет ли существовать какая-то связь между макрохарактеристиками образца, полученными при статическом нагружении, с характеристиками (скорость распространения волн), полученными в динамике?

Рассматривается следующая упрощенная ситуация. Имеется некоторый стержень с постоянным сечением по длине, пусть для него модуль Юнга имеет распределение

$$E = E_0 + E_1 \sin \alpha x, \quad (1)$$

где E_0, E_1, α - заданные числа, x - координата. Очевидно, что модуль Юнга E имеет максимальное значение в точках с координатами

$$x = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi k \right), \quad k \in Z,$$

минимальные значения E находятся в точках с координатами

$$x = \frac{1}{\alpha} \left(-\frac{\pi}{2} + 2\pi k \right), \quad k \in Z.$$

Таким образом стержень можно трактовать как бы состоящим из некоторых элементов с максимальной жесткостью $E = E_0 + E_1$, разделенных прослойками с минимальной жесткостью $E = E_0 - E_1$, длина блоков здесь определяется через параметр α : $l = \frac{2\pi}{\alpha}$. Легко видеть, что среднее значение модуля Юнга для стержня длины $L = nl/2$ (n число полуволн) есть

$$E_{cp} = \frac{1}{L} \int_0^L \left(E_0 + E_1 \sin \frac{n\pi}{L} x \right) dx = E_0 - \frac{1}{n\pi} [\cos n\pi - 1],$$

что означает стремление E_{cp} к E_0 при $n \rightarrow \infty$.

Пусть стержень грузится статически. Для определения его состояния имеем уравнение равновесия, закон Гука, соотношения Коши.

Граничные условия возьмем в виде:

$$u|_{x=0} = 0, \quad \sigma_x|_{x=L} = -\sigma_0. \quad (2)$$

Из указанных уравнений и (2) следует, что напряжение σ_x можно считать константой: $\sigma_x = -\sigma_0$, для определения смещения u имеется уравнение:

$$-\frac{\sigma_0}{E_0 + E_1 \sin \alpha x} = \frac{du}{dx}, \quad (3)$$

которое при интегрировании при условии (2) и того, что $|E_1| < |E_0|$, дает значение

$$-\frac{uE_0}{\sigma_0} = \frac{2}{\alpha \sqrt{1 - \frac{E_1^2}{E_0^2}}} \left(\arctg \frac{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} x \right)}{\sqrt{1 - \frac{E_1^2}{E_0^2}}} - \arctg \left(\frac{\frac{E_1}{E_0}}{\sqrt{1 - \frac{E_1^2}{E_0^2}}} \right) \right). \quad (4)$$

(4) - решение для статического сжатия стержня. Оно сложным образом зависит от E_1 и E_0 , в то же время при $\alpha \rightarrow 0$ левая его часть стремится к x . На рис.1 показана зависимость относительного смещения слева в (4) от x .

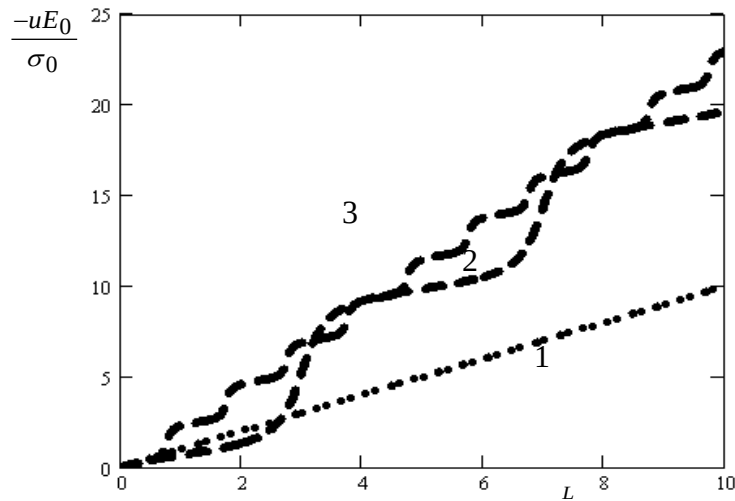


Рис. 1. Зависимость смещения $\frac{-uE_0}{\sigma_0}$ от координаты x .

Линия 1 соответствует $E_1 = 0$, линии 2 и 3 соответствуют значению

$E_1 = 0,9E_0$, для линии 2- $n = 5$, для линии 3 - $n = 50$

Видно, что модуль Юнга, определяемый величиной E_0/k , где k - отношение относительного смещения $\frac{-uE_0}{\sigma_0}$ в точке x к значению x , уменьшается с ростом отношения E_1/E_0 . Так для $E_1/E_0 = 0,9$ значение модуля Юнга в 2,5 раза меньше, чем для $E_1/E_0 = 0$. Этот факт должен отразиться в динамике – скорость движения продольной волны в неоднородном стержне должна быть меньше, чем в однородном с модулем Юнга E_0 .

Далее исследуем динамическое сжатие стержня, при этом основное внимание обращается на скорость распространения волны от параметров $\chi = E_1/E_0$ и n . Для решения задачи введены безразмерные величины: $\tilde{t} = \sqrt{\frac{E_0}{\rho(x)}} \frac{t}{L}$ - безразмерное время, безразмерная координата $\tilde{x} = x/L$.

Уравнение равновесия переписывается в виде:

$$(1 + \chi \sin(n\pi\tilde{x})) \frac{\partial^2 u}{\partial \tilde{x}^2} + \chi n\pi \cos(n\pi\tilde{x}) \frac{\partial u}{\partial \tilde{x}} = \frac{\partial^2 u}{\partial \tilde{t}^2}. \quad (5)$$

Данное уравнение решалось методом конечных разностей по явной схеме. Поскольку скорость волны зависит от x , то шаг по времени в расчетах соответствовал минимальному значению скорости движения волны.

Начальные условия для стержня нулевые. В момент $t = 0$ к левому концу стержня подавался импульс. Рассматривался момент прихода возмущения в правый конец. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Здесь сплошной линией отмечена зависимость скорости V от χ при $n=5$, пунктирной при $n=30$. Видно, что скорость распространения волны при $\chi = 0,9$ почти в два раза меньше, чем при $\chi = 0,1$.

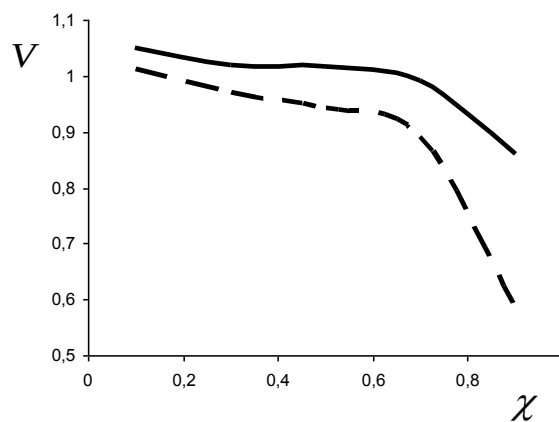


Рис. 2. Зависимость скорости V от χ при $n=5$, пунктирная при $n=30$

На рис. 3 показана зависимость относительного смещения $\frac{-uE_0}{\sigma_0}$ от количества шагов по координате i и от количества полувольт n в разные моменты времени (здесь нет отражения волны от противоположного края стержня).

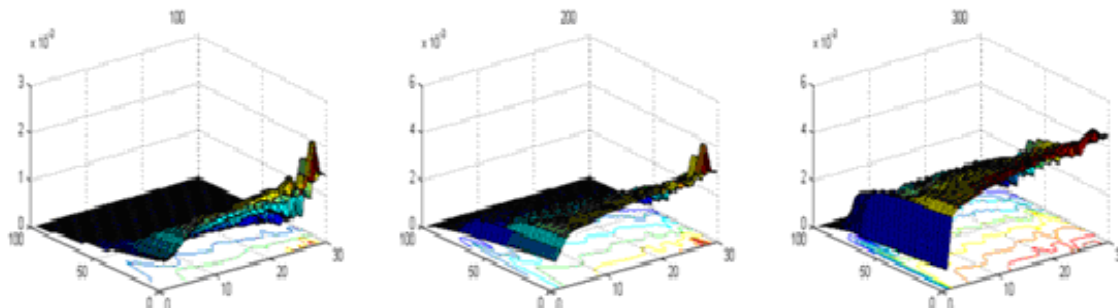


Рис. 3. Зависимость смещений $\frac{-uE_0}{\sigma_0}$ от количества шагов по координате i (от 0 до 100) и от количества полувольт n (от 1 до 30) в разные моменты времени. Первый раз до конца стержня волна приходит в момент времени 300

Из рассмотренных примеров можно заключить, что неоднородность среды влияет на значения макрохарактеристик среды, в большей степени они зависят от различия в свойствах блоков и прослоек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Христианович С.А. Деформация упрочняющегося пластического материала, Известия Российской академии наук, Механика твердого тела, 1974, № 2.
2. Христианович С.А., Шемякин Е.И. К теории идеальной, Известия Российской академии наук, Механика твердого тела, 1967, № 4.
3. Райс Дж. Р. Локализация пластической деформации. - В кн.: Теоретическая и прикладная механика. Пер. с англ./Под ред. В. Койтера. - М.: Мир, 1979.
4. Rudnicki J.W., Rice J.R. J. Mech and Phys. Solids, 1975, v.23.
5. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды, Прикладная математика и механика, 1971, Т. 35, № 6.
6. Чанышев А.И. Механическая модель упруго пластического тела. (статья) ПМТФ. — 1989-№5
7. Сарайкин В. А. Учет упругих свойств блоков в низкочастотной составляющей волны возмущений, распространяющейся в двумерной среде // ФТПРПИ. — 2009. — № 3.
8. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. — 2004. — № 6.
9. Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б., Косинов Д.А. Локализация пластической деформации в монокристаллах легированного γ — железа при электролитическом насыщении водородом, Известия высших учебных заведений, Черная металлургия, 2013, № 8.
10. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения, Новосибирск, «Наука», 2008г.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, 2014

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ В РЕШЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Гелий Романович Бочкарев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)217-06-42, e-mail: grboch@misd.nsc.ru

Галина Ивановна Пушкарева

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)217-02-24, e-mail: galinapush@mail.ru

Ксения Андреевна Коваленко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)217-02-24, e-mail: kovalenko-ksusha@mail.ru

Отмечена высокая степень загрязненности сточных вод предприятий горно-промышленного комплекса и необходимость их очистки. Приведены результаты сорбционной очистки сточных вод от ионов тяжелых, цветных металлов и мышьяка с использованием магнийсодержащих минералов брусита, магнезита и марганцевых руд различного генезиса. Показана высокая эффективность и перспективность применения данного природного минерального сырья.

Ключевые слова: сточные воды, сорбционная очистка, окисление, брусит, магнезит, марганцевые руды.

USAGE OF NATURAL MINERALS IN ECOLOGICAL PROBLEM HANDLING AT MINES AND PROCESSING PLANTS

Gely R. Bochkarev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk 54 Krasny prospect, DrEng, Principal, Researcher, Mineral Beneficiation and Process Ecology Laboratory, tel. (383)217-06-42, e-mail: grboch@misd.nsc.ru

Galina I. Pushkareva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, Mineral, Beneficiation and Process Ecology Laboratory, tel. (383)217-02-24, e-mail: galinapush@mail.ru

Ksenia A. Kovalenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Mineral, Beneficiation and Process Ecology Laboratory, tel. (383)217-02-24, e-mail: kovalenko-ksusha@mail.ru

The wastewater at mines and processing plants are highly contaminated and require purification. The article reports the results of sorptive removal of heavy metals, nonferrous metals and arsenic from process wastewater using magnesium-containing minerals of brucite, magnesite and different-genesis manganese ore. The high performance and application perspectiveness of the listed minerals is illustrated in the article.

Key words: process wastewater, sorptive removal, oxidation, brucite, magnesite, manganese ore.

Деятельность предприятий горно-промышленного комплекса (ГПК) неизбежно сопровождается загрязнением водного бассейна недостаточно очищенными сточными водами. В реки сбрасывается ежегодно более 2,3 млн.т свинца, 1,6 млн.т марганца, 1 млн.т цинка, около 0,5 млн.т меди и других опасных веществ. Интенсивность загрязнения 30% подземных вод достигает 100 ПДК и выше. В результате этого примерно 60% пресных вод России не используется для питья [1]. Учитывая это, поиск эффективных способов очистки сточных вод до санитарных норм является актуальной научно-технической задачей, имеющей большое значение для повышения природоохранной деятельности ГПК*.

Перспективным решением данной задачи может стать сорбционная очистка сточных вод, с использованием природных сорбентов. Повышенное внимание именно к применению природных сорбентов обусловлено тем, что они могут обладать высокими сорбционными свойствами и быть в десятки раз дешевле синтетических. Авторами проведены исследования возможности использования магний- и марганецсодержащих минералов в процессах сорбционной очистки сточных вод предприятий горного производства.

Среди промышленных магнийсодержащих минералов первое место по содержанию оксида магния (до 69%) занимает брусит, химическая формула $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Магнезит – природный карбонат магния $\text{Mg}(\text{CO}_3)$ имеет теоретический состав 47,62% MgO и 52,38% CO_2 [2]. Ранее было установлено, что природный брусит проявляет сорбционные свойства по отношению к ионам металлов, мышьяку, органическим загрязнениям, обуславливающим цветность воды, и др. [3 – 5]. Магнезит проявляет слабо выраженные сорбционные свойства. Как показали исследования сорбционные свойства и брусита, и магнезита могут быть значительно увеличены термическим модифицированием. Методом рентгеноструктурного анализа было доказано, что прокаливание брусита и магнезита при 600-700°C приводит к разрушению их структуры и образованию «дефектной» кристаллической структуры периклаза (MgO), за счет удаления H_2O и CO_2 , соответственно [6].

Следует отметить, что термически модифицированные минералы при контакте с водой проявляют высокие щелочные свойства, их можно использовать для нейтрализации кислотных сточных вод.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00319).

Это свойство позволяет исключить использование других нейтрализующих химических реагентов, что значительно упрощает технологические схемы очистки.

Результаты сорбционной очистки реальных сточных вод предприятий ГПК комплекса представлены в табл. 1, 2. Стоки имеют сложный состав, содержат высокую концентрацию свободной кислоты. Очистку стоков проводили в статических условиях в две ступени. Сначала нейтрализовали, добавляением сорбентов до pH – 6,5-8,5 при перемешивании. Отделяли осадок отстаиванием или фильтрованием. Затем, для доочистки сточной воды, добавляли сорбенты до pH–8,5-9,5, отделяли осадок, определяли остаточные концентрации загрязняющих веществ. Термически обработанные брусит и магнезит проявляют высокие сорбционные свойства по отношению к присутствующим металлам и мышьяку, что позволяет очистить стоки до санитарных норм. Расход сорбентов зависит от содержания кислоты и загрязняющих веществ в сточной воде.

Таблица 1

Результаты сорбционной очистки сточной воды
на модифицированном брусите

Ступень очистки (расход сорбента)	pH	Концентрация, мг/л								
		As	Al	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sn	Zn
Исходное содержание	1,49	43,0	0,67	32,0	3,5	0,5	0,6	33,0	10,0	168,0
I (2 г/л)	6,85	5,6	н/о*	0,35	н/о	0,4	0,03	0,73	н/о	132
II (3 г/л)	8,45	н/о	н/о	0,02	н/о	0,25	0,01	н/о	н/о	1,25

* на грани обнаружения

Таблица 2

Результаты сорбционной очистки сточной воды
на модифицированном магнезите

Ступень очистки (расход сорбента)	pH	Концентрация, мг/л			
		As	Cu	Fe	Zn
Исходное содержание	0,9	2050	0,84	14,0	1809,6
I (33,1 г/л)	8,39	8,25	н/о	0,27	5,52
II (4,5 г/л)	9,48	н/о	н/о	н/о	0,68

В качестве перспективных сорбционных материалов для очистки сточных вод можно рассматривать и марганцевые руды. Известно, что оксид марган-

ца(IV) обладает окислительными и сорбционными свойствами по отношению ко многим загрязняющим веществам в водных средах. В существующих схемах водоочистки используются различные материалы, которые получают путем нанесения MnO_2 на поверхность песка, глины, цеолитов (Manganese Green Sand, Green Sand Plus, MTM, Pyrolox и др.) и они в основном иностранного производства. Их главные недостатки – высокая стоимость и необходимость возобновления активного слоя. Альтернативным источником MnO_2 могут стать природные марганцевые руды.

Объектами исследования были выбраны марганцевые руды трех месторождений Сибири: Дурновского, Порожинского, Усинского. Главным рудным минералом Дурновского месторождения 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 видами, различающимися минеральным составом и содержанием марганца: родохрозитовые, манганокальцитовые, кремнисто-карбонатные и карбонатно-силикатные. Окисленные руды представлены псиломелановыми, вернадитовыми и пиролюзитовыми минеральными разновидностями.

Руды Усинского и Порожинского месторождений были термически обработаны для разложения карбонатов. В процессе исследований определено, что оптимальной температурой прокаливания является $700^{\circ}C$, т.к. при этих условиях происходит практически полное разрушение структуры минералов и образование окислов $Mn(III,IV)$. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что структура их плохо окристаллизованная, несовершенная и это позволяет предположить наличие высокого содержания активных центров и, следовательно, высокой сорбционной способности. В руде Порожинского месторождения практически все соединения марганца (манганит, родохрозит) превратились в биксбиит (Mn_2O_3). В руде Усинского месторождения родохрозиты полностью превратились в гаусманит ($MnMn_2O_4$).

Руду Дурновского месторождения обогащали методом магнитной сепарации в магнитном поле напряженность $955000a/m$ ($12000э$), концентрация марганца повысилась с 16,36 до 36,53%. Увеличение концентрации железа в руде не имеет отрицательного значения для решения поставленной задачи, так как соединения железа также используются в качестве сорбентов для извлечения ионов тяжелых и цветных металлов и других загрязнений из водных сред. В табл. 3 приведен элементный состав исходных и обработанных образцов марганцевых руд.

Исследование сорбционных свойств исходных и обработанных марганцевых руд проводили на сточной воде одного из металлургических заводов Урала, содержащей, мг/л: Cu – 5,4; Pb – 2,16; Zn – 43,45; As – 4,95. Расход сорбентов – 6 г/л; pH – 4-4,3; время перемешивания – 30 минут. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 3

Элементный состав исходных и обработанных марганцевых руд

Марганцевая руда	Элементный состав, вес.% (основные компоненты)								
	Si	Mn	Fe	Ba	Al	Ca	Mg	K	P
Усинское месторождение									
Исходная	8,03	20,08	3,41	0,33	1,04	30,12	3,61	0,16	0,07
Термически обработанная	6,70	22,23	3,40	0,37	0,88	30,08	3,69	0,15	0,07
Порожинское месторождение									
Исходная	6,02	47,04	3,74	0,30	2,92	6,73	1,28	0,89	0,8
Термически обработанная	5,77	46,00	3,77	0,18	3,05	7,50	1,54	0,86	0,91
Дурновское месторождение									
Исходная	21,43	16,36	11,46	5,91	2,29	2,44	0,74	0,36	–
Обогащенная	7,08	36,53	17,13	8,19	1,64	0,59	0,51	0,2	0,02

Таблица 4

Результаты сорбционной очистки сточной воды на марганцевых рудах

Вид сорбента	Степень извлечения элементов из сточной воды, %			
	Медь	Свинец	Цинк	Мышьяк
Марганцевая руда Дурновского месторождения				
исходная	99	99	41	76
обработанная	89	100	13	78
Марганцевая руда Порожинского месторождения				
исходная	99	100	41	58
обработанная	100	100	66	97
Марганцевая руда Усинского месторождения				
исходная	98	98	41	69
обработанная	99	96	77	89

Медь и свинец эффективно удаляются из стока как исходными, так и обработанными рудами. Степень извлечения цинка из сточной воды значительно ниже, чем других элементов и, очевидно, что расход сорбента необходимо увеличить для его полного извлечения. Руда Усинского месторождения имеет явные преимущества по сравнению с другими рудами по отношению к цинку. Мышьяк наиболее полно удаляется при использовании термически обработанной руды Порожинского месторождения, в которой самое высокое содержание марганца. В водных системах As находится преимущественно в виде арсенатов (V) и арсенидов (III), причем последняя форма более опасна и, как правило, сложнее удаляется из воды, чем As (V). Поэтому при очистке мышьяк содер-

жащих вод часто используют предварительное окисление As (III) до As (V) . Экспериментально доказано, что марганцевые руды кроме сорбционных свойств, проявляют высокую окислительную активность по отношению к As(III) и позволяют переводить его в менее токсичную форму As (V). Так при концентрации арсенитов ~ 4,5 мг/л марганцевая руда Дурновского месторождения почти полностью (80 – 88%) окисляет их до арсенатов [7].

Таким образом, приведенные результаты показывают эффективность и перспективность использования магний- и марганецсодержащих минералов для сорбционной очистки сточных вод предприятий ГПК, с целью снижения экологического ущерба, наносимого природным водным объектам и потерь металлов со сточными водами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комащенко В.И., Голик В.И., Дребенштедт К. Влияние деятельности геологоразведочной и горнодобывающей промышленности на окружающую среду: монография. – М.: Университет Книжный Дом, 2010. – 355 с.
2. Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Магnezит и брусит. – М.: ФГУ ГКЗ, 2007. – 32 с.
3. Пушкарева Г.И. Сорбционное извлечение металлов из моно- и поликомпонентных растворов с использованием брусита // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 6. – С. 110 –113.
4. Пат. 2315003 Российская Федерация, МПК C02F 1/28, B01J 20/24, B01J 20/04, C02F 103/04. Способ очистки воды от органических соединений, обуславливающих ее цветность / Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела СО РАН. – № 2006109945/15; заявл. 28.03.2006; опубл. 20.01.2008 Бюл. № 2.
5. Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И., Коваленко К.А. Извлечение мышьяка из природных вод и технологических растворов с использованием природного сорбента и катализатора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 2. – С. 102–108.
6. Пушкарева Г.И. Влияние температурной обработки брусита на его сорбционные свойства // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2000. – № 6. – С. 90–93.
7. Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И., Коваленко К.А. О сорбционных свойствах марганцевых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 118–122.

© Г. Р. Бочкарев, Г. И. Пушкарева, К. А. Коваленко, 2014

РАЗРАБОТКА СКВАЖИННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТОЙ¹

Геннадий Андреевич Кремлев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)335-94-45

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

Юрий Валентинович Погарский

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)335-94-45

Проведен сравнительный анализ наземных и скважинных виброисточников гармонических колебаний. Определены силовые, скоростные и частотные характеристики вибратора. Показаны достоинства использования генератора с регулируемой частотой и указана область его применения.

Ключевые слова: скважинный виброисточник, гармонические колебания, регулирование частоты.

DOWNHOLE SOURCE OF HARMONIC VIBRATIONS WITH ADJUSTABLE FRICTION

Gennady A. Kremlev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)335-94-45

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Laboratory for Power Electromagnetic Pulse Systems, tel. (383) 217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

Yury V. Pogarsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Pulse Systems, tel. (383)335-94-45

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 14-05-31395-мол_a.

The surface and downhole sources of harmonic vibration are compared. The authors determine the power, velocity and frequency characteristics of the downhole vibration source and describe preferences of the adjustable frequency vibration source and its application range.

Key words: downhole vibration source, harmonic vibrations, frequency adjustment.

В процессе разработки нефтяного месторождения удаётся извлечь лишь часть нефти, большая ее часть (до 40-60%) остаётся в пласте. Низкий коэффициент извлечения нефти из пласта стимулирует поиск новых технологических решений повышения нефтеотдачи.

К настоящему времени в мировой и отечественной практике нефтедобычи сложилось обоснованное представление об эффективности и перспективности применения волновых технологий воздействия на истощенные, высокообводненные нефтяные пласты с целью интенсификации добычи нефти.

Результатами многолетнего применения вибросейсмического метода воздействия с земной поверхности на продуктивные пласты, с целью увеличения нефтеотдачи более чем на 15 месторождениях являются значительные повышение дебетов добывающих скважин [1].

Существенным недостатком наземных виброисточников является то, что при воздействии на продуктивный пласт большая часть энергии затухает в толще горных пород.

Наиболее перспективными, среди известных источников волновых воздействий, являются скважинные системы. Обладая высокими энергетическими показателями, они отличаются возможностью быстрой практической реализации. Основанием для этого являются следующие обстоятельства:

1. Принципиально более высокий к.п.д. процесса за счёт отсутствия потерь энергии, характерных для поверхностных воздействий или воздействий, связанных с их передачей по длинным (механическим, гидравлическим) каналам;
2. Наличие на нефтепромыслах большого количества скважин эксплуатируемых винтовыми насосами. Тысячи из них могут быть использованы для волновых воздействий;
3. Широкое распространение на промыслах серийно изготавливаемого оборудования, оснастки, которые могут быть использованы для скважинных волновых воздействий; техническая, технологическая, эксплуатационная и кадровая подготовленность нефтепромыслов к работам по этим технологиям;
4. Низкая стоимость оборудования; масштабность применения.

В ИГД СО РАН разработан скважинный виброисточник дебалансного типа (рис. 1), который размещается в скважине на глубине залегания продуктивного пласта. Источник обладает возможностью регулирования частоты излучаемых колебаний с целью обеспечения оптимальных параметров воздействия на пласт.

В ходе проектирования была разработана конструктивная схема, подобраны комплектующие и рассчитаны силовые и скоростные параметры вибровозбудителя, приведенные в табл. 1.

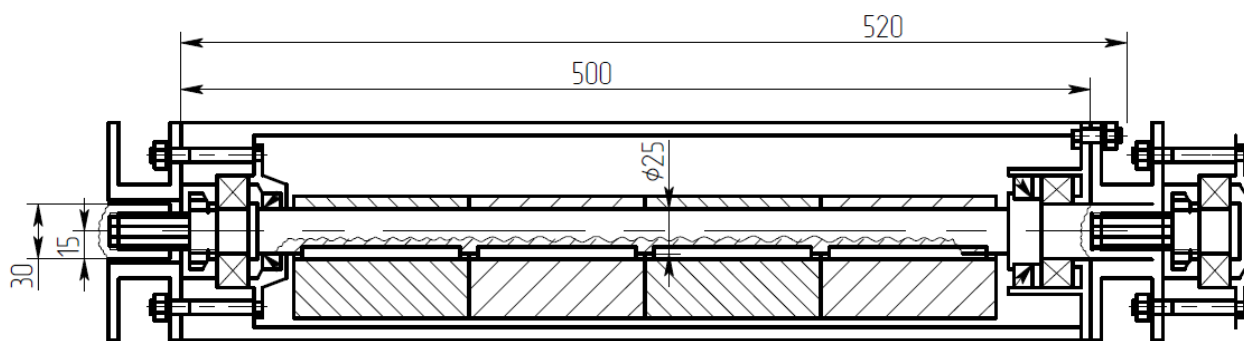


Рис. 1. Эскиз отдельного виброблока

Таблица 1

Зависимость силы, создаваемой дебалансом, от частоты вращения вала

$n, \text{об/мин}$	$\omega, \text{рад/с}$	$f, \text{Гц}$	$F, \text{Н}$	$F, \text{кгс}$
600	62,8	10,0	576	58,7
800	83,8	13,3	1025	105
1000	105	16,7	1610	164
1200	126	20,2	2320	236
1400	147	23,3	3160	322

Виброисточник представляет собой вал, с закрепленным на нем дебалансом, помещенный в цилиндрический корпус и приводимый в движение электродвигателем. Комплект виброблоков помещается в скважину и с помощью якорной системы фиксируется в ней (рис. 2). Колебания, создаваемые вибратором, через обсадную колонну передаются в продуктивный пласт.

На месторождениях, эксплуатируемых винтовыми насосами, наиболее технологично использовать привод генератора через штанги от стандартного электродвигателя, расположенного на поверхности. Для кратковременных обработок призабойной зоны пласта или ввода скважин в эксплуатацию предусмотрено совместное расположение генератора и погружного электродвигателя.

Данный вибратор, в настоящее время, находится на стадии создания опытной модели для дальнейшего исследования его воздействия на продуктивный пласт. Также планируются стендовые испытания вибратора для исследования его параметров излучения в различных режимах работы.

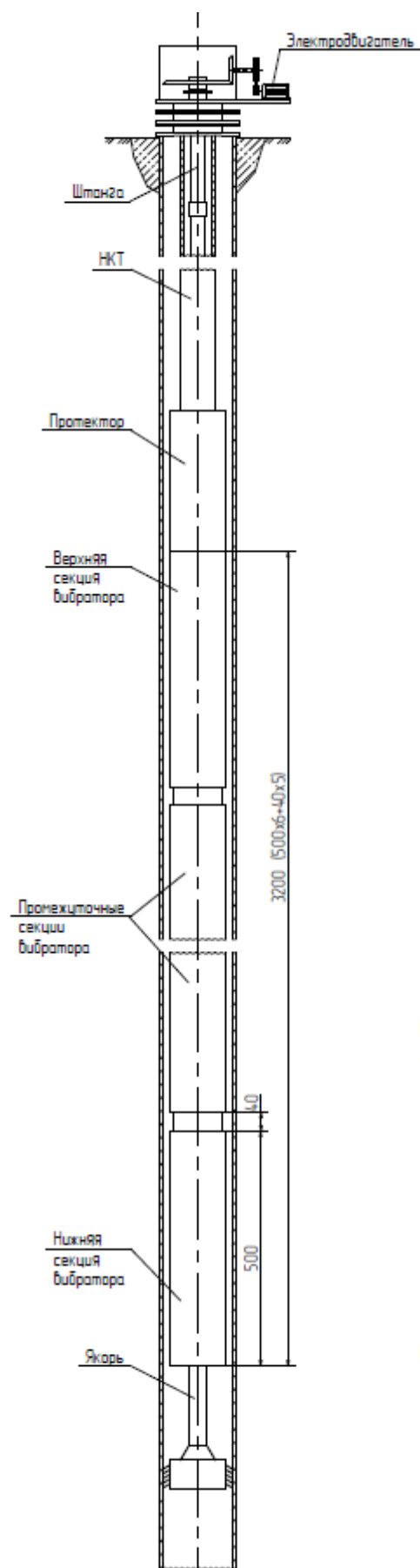


Рис. 2. Комплект виброблоков, установленных в скважине

Благодаря расположению вибратора в скважине, энергия вводится непосредственно в продуктивный пласт, и оказывает направленное воздействие непосредственно на призабойную зону и продуктивный пласт. А регулирование частоты колебаний позволяет настраивать виброисточник на резонансную частоту пласта, тем самым обеспечивая большую амплитуду колебаний и соответственно лучшую эффективность вибровоздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. - Новосибирск: Наука, 2010.

© Г. А. Кремлев, А. В. Савченко, Ю. В. Погарский, 2014

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ФЛЮИДОВ В ТРЕЩИНОВАТО-БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЕ С УЧЕТОМ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ¹

Дмитрий Сергеевич Евстигнеев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО АН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)335-94-45, 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, научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

Приводится численное решение задачи одномерной стационарной фильтрации в рамках модели Маскета-Леверетта с учетом капиллярных сил. Аппроксимации уравнений Маскета-Леверетта, в переменных давление-насыщенность, решается в два этапа. На первом этапе решается гиперболическое уравнение для водонасыщенности, которое описывает движение вытесняющего флюида. При этом используется явная конечно-разностная схема 4-го порядка точности. На втором этапе решается параболическое уравнение для водонасыщенности, описывающее действие капиллярных сил. Для его аппроксимации строится консервативная неявная разностная схема с итерацией по неоднородности. Предложенный подход известен как метод расщепления по физическим процессам. Аппроксимация эллиптического уравнения для давления реализуется неявной итерационной схемой.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, модель Маскета-Леверетта, «концевой» эффект, итерации по нелинейности.

SOLUTION OF THE PROBLEM ON STATIONARY FILTRATION OF IMMISCIBLE FLUIDS IN A FISSURED BLOCKY STRUCTURE, CONSIDERING CAPILLARY FORCES

Dmitry S. Evstigneev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)335-94-45, e-mail: dima503@pochta.ru

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Laboratory for Power Electromagnetic Pulse Systems, tel. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

The authors solve numerically the one-dimensional stationary filtration problem in the framework of the Masket–Leverett model, considering capillary forces. Equations in terms of pressure–saturation variables are approximated in two stages. The offered approach is known as the

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 14-05-31395-мол_а.

method of splitting by physical processes. The elliptical equation for pressure is approximated by the implicit iteration scheme.

Key words: two-phase filtration, Masket–Leverett model, “end” effect, nonlinearity iteration.

В практике нефтедобычи сталкиваются с проблемой тампонирувания водной эксплуатационных скважин под воздействием избыточного давления на нагнетающей галерее скважин. Тампонирувание может быть вызвано проникновением в пласт фильтрата бурового раствора при проходке скважин, гидроразрывом пласта и др. Важным является момент, когда вытесняющая фаза – вода достигает частично затампонированной прискважинной зоны. С этого момента начинается интенсивное обводнение скважины. С целью увеличения нефтеотдачи используют различные технологии, например вибровоздействие на нефтяной продуктивный пласт. Вибровоздействие приводит к перестройке коллекторов, по которым движется флюид. При этом образуются нефтяные целики в трещиновато-пористой структуре. В работе [6] нами предпринималась попытка рассмотреть идеализированный целик, обтекаемый вытесняющим флюидом. Данная задача рассматривалась в плоской постановке. Недостатком предложенной в [6] модели является пренебрежение капиллярными силами, которые формируют капиллярное замыкание нефти в целике, так называемый “концевой эффект”. Вибровоздействие приводит к ослаблению капиллярных сил и, как следствие, к новой постановке задачи нестационарной фильтрации, с измененными параметрами вязкостей и функцией капиллярного давления. В настоящей статье рассмотрим стационарное вытеснение нефти из целика водой под действием капиллярных сил, которые учтены в модели Маскета-Левеетта.

1. Постановка задачи. Рассмотрим модель двухфазной изотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей [1]. Предположим, что фазы (воды, нефти, а также скелета – пор) несжимаемы, тогда уравнения баланса масс для каждой из фаз имеют вид:

$$\begin{cases} m \partial s / \partial t + \operatorname{div} \vec{w}_1 = 0 \\ -m \partial s / \partial t + \operatorname{div} \vec{w}_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где m – коэффициент пористости, $s = s_w$ – водонасыщенность, s_o – нефтенасыщенность ($s_w + s_o = 1 \Rightarrow s_o = 1 - s_w \Rightarrow \partial s_o / \partial t = \partial(1 - s_w) / \partial t = -\partial s_w / \partial t$), $\vec{w}_1$ – вектор скорости фильтрации *вытесняющей* фазы, т.е. воды; $\vec{w}_2$ – вектор скорости фильтрации *вытесняемой* фазы, т.е. нефти.

Для каждой из фаз считается справедливым обобщенный закон Дарси для скоростей:

$$\vec{w}_i = -k \cdot k_{w,o} s / \eta_i \cdot \operatorname{grad} \Phi_i, \quad \Phi_i = p_i + \rho_i g H \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

где k – абсолютная проницаемость пласта; η_i – коэффициенты динамической вязкости воды и нефти, которые считаем постоянными $\eta_i^0 = \operatorname{const}_i$; p_i – давле-

ние в каждой из фаз ($i = 1$ - вода, $i = 2$ - нефть); $\rho_i g H$ – гидростатическое давление в каждой из фаз; $k_w s$, $k_o s$ – фазовые относительные проницаемости для воды и нефти определим по модели Кори:

$$k_w s = k_w^0 \left[\frac{s - s_{wc}}{1 - s_{or} - s_{wc}} \right]^\alpha \quad (3)$$

$$k_o s = k_o^0 \left[\frac{1 - s_{or} - s}{1 - s_{or} - s_{wc}} \right]^\beta \quad (4)$$

где k_w^0 – относительная проницаемость по воде при остаточной нефтенасыщенности, k_o^0 – относительная проницаемость по нефти при остаточной водонасыщенности, s – водонасыщенность, s_{wc} – насыщенность связанной водой, s_{or} – насыщенность остаточной нефтью, α , β – экспоненциальные значения относительной нефте- или водопроницаемости (экспоненты Кори).

В теории фильтрации принято считать, что статическое равновесие в пористой среде, заполненной двумя различными несмешивающимися жидкостями, возможно благодаря наличию капиллярного скачка давления, величина которого определяется как функция от насыщенности вытесняющей фазы:

$$P_k(s) = p_1 - p_2.$$

$P_k(s)$ при заданных характеристиках пористой среды является экспериментально измеряемой функцией, так же как и функция Леверетта $J(s)$, которая связана с капиллярным давлением соотношением:

$$P_k(s) = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{m}{k}} J(s), \quad (5)$$

σ – коэффициент поверхностного натяжения; θ – краевой угол смачивания; $J(s)$ – универсальная функция пористой среды. Эксперименты показывают, что она одинакова для целых классов пористых сред со сходной структурой порового пространства [1].

Полученную систему (1-5) можно редуцировать к квазилинейной системе двух уравнений, одно из которых является уравнением эллиптического типа для давления, а другое – вырождающимся уравнением параболического типа для водонасыщенности. Следуя работе [2], выберем в качестве искомых функций p_2 , s и рассмотрим случай одномерного плоскопараллельного, осесимметричного движения. Такая постановка дает возможность не рассматривать влияние гравитационных сил, т.е. пренебречь в (2) гидростатическим давлением.

$$\begin{cases} \operatorname{div} (k_1(s) + k_2(s)) \operatorname{grad} p_2 + \operatorname{div} k_1(s) P'_k(s) \operatorname{grad} s = 0 \\ m \partial s / \partial t + \operatorname{div} k_1(s) \operatorname{grad} p_2 + \operatorname{div} k_1(s) P'_k(s) \operatorname{grad} s = 0 \end{cases} \quad (6)$$

где $k_i(s) = k \cdot k_{w,o} s / \eta_i$, $i = 1, 2$.

Система (6) замкнута относительно водонасыщенности и давления. Для ее решения необходимо задать:

Начальные условия:

$t = 0$: $s = s_0(x)$ (водонасыщенность), $p = p_0(x)$ (поровое давление).

Граничные условия:

$x = 0$: $s = s^0(0, t)$, $p = p^0(0, t)$ водонасыщенность и давление на нагнетательной стороне. Пологая, что через границу $x = 0$ в пласт закачивается вода, с объемным расходом Q_0 и нет потока нефти через эту границу, можно записать: $k_2(s)P'_k(s)\partial s / \partial x = Q_0$.

$x = L$: $p = p_L(L)$, $p_L < p^0$ (давление на эксплуатационной стороне блока). Пусть на границе $x = L$ отбирается только нефть и нет потока вытесняющей фазы, тогда: $k_1(s)P'_k(s)\partial s / \partial x = -Q_0$.

2. Аппроксимация задачи стационарной фильтрации. Для аппроксимации 1-мерной задачи стационарной фильтрации представим систему (6) в более удобном, безразмерном виде:

$$\begin{cases} \partial / \partial x (k_1(s) + k_2(s)) \partial p / \partial x + \partial / \partial x k_1(s) P'_k(s) \partial s / \partial x = 0 \\ \partial s / \partial t + \partial / \partial x k_1(s) \partial p / \partial x + \partial / \partial x k_1(s) P'_k(s) \partial s / \partial x = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где введены безразмерные давление $p = \tilde{p}_2 / p^0$, координата $x = x / L$, время $t = \tilde{t} \cdot Q_0 / (mL)$.

Начальные и граничные условия также приводятся к безразмерным величинам.

Аппроксимация первого уравнения в системе (7) имеет вид [2]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h} \left[(k_1(s) + k_2(s))_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{p_{i+1}^{n+1} - p_i^{n+1}}{h} - (k_1(s) + k_2(s))_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{p_i^{n+1} - p_{i-1}^{n+1}}{h} \right] = \\ & = - \frac{1}{h} \left[(k_1(s) P'_k(s))_{i+\frac{1}{2}}^n \frac{s_{i+1}^n - s_i^n}{h} - (k_1(s) P'_k(s))_{i-\frac{1}{2}}^n \frac{s_i^n - s_{i-1}^n}{h} \right]. \end{aligned}$$

Давление на каждом временном слое n определялось следуя работе [3], где итерационным методом разрешается эллиптическое уравнение относительно давления p^{n+1} . Порядок аппроксимации схемы по давлению $o(h^2)$. После того как будет найдено p^{n+1} , с использованием s^n , переходим к аппроксимации 2-го уравнения системы (7).

Второе уравнение (7) является вырожденным на границах нагнетательной стороны и стока. Поэтому, если учитывать капиллярные силы, то реальный физический процесс изменения водонасыщенности можно представить состоящим из двух частей [2]: 1) перенос достигнутых значений водонасыщенности, 2) действие капиллярных сил. Для снятия различных противоречий, возникающих

в ходе аппроксимации второго уравнения (7), прибегнем к формулировке метода расщепления по физическим процессам [4]. Приведем основную идею метода расщепления по физическим процессам.

Пусть известно распределение водонасыщенности на момент времени t . Переход на момент времени $t + \tau$ будем осуществлять в два этапа. На первом этапе, используя s^n в качестве начальных данных, определяем $\tilde{s}$ как решение уравнения:

$$\partial s / \partial t + \partial / \partial x k_1(s) \partial p / \partial x = 0 \quad (8)$$

На втором этапе полученное $\tilde{s}$ используется в качестве начальных данных при определении s^{n+1} из уравнения:

$$\partial s / \partial t + \partial / \partial x k_1(s) P'_k(s) \partial s / \partial x = 0. \quad (9)$$

Уравнение (8) мы будем аппроксимировать методом конечных разностей, явная схема сквозного счета 4-го порядка точности по пространственной переменной [5, 6] $O(h^4 + \tau)$, а уравнение (9) – методом конечных разностей, полностью неявной схемой:

$$\frac{s_i^{n+1} - s_i^n}{\tau} + \frac{1}{h} \left[q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{s_{i+1}^{n+1} - s_i^{n+1}}{h} - q_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{s_i^{n+1} - s_{i-1}^{n+1}}{h} \right] = 0, \quad (10)$$

где $q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{1}{\alpha_i^{n+1}}$, $\alpha_i^{n+1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{q_i^{n+1}} + \frac{1}{q_{i+1}^{n+1}} \right)$, $q_i^{n+1} = k_1(s_i^{n+1}) P'_k(s_i^{n+1})$.

Разностное уравнение (10) нелинейно относительно s^{n+1} . Линеаризацию (10) будем проводить методом простой итерации. Для этого вычислим q с предыдущего, n -го шага. Далее, определим $s^{n+1 \nu+1}$ взяв q^{n+1} с предыдущей, ν -й итерации.

Граничные условия будем аппроксимировать по предложенному в [2] алгоритму. При $x = 0$ в узле $i = 0$ будем считать заданной водонасыщенность, а в точке $i = 1$ будем определять водонасыщенность со 2-м порядком аппроксимации:

$$q_{\frac{3}{2}} \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)_{i=0}^{n+1} = \left(\frac{k_1(s)}{k_1(s) + k_2(s)} \right)_0^{n+1} - \frac{h}{2} \left(\frac{s_0^{n+1} - s_0^n}{\tau} + \left(\frac{\partial k_1(s) \partial p / \partial x}{\partial x} \right)_{i=0}^{n+1} \right)$$

При $x = 1$ имеет место вырождение как самого 2-го уравнения в (7), так и соответствующего граничного условия. Поэтому вместо аппроксимации 2-го уравнения в (7) на добывающей стороне в узле $i = N - 1$ проводят аппроксимацию в ближайшем узле $i = N - 1/2$, приняв во внимание аппроксимацию граничного условия в узле $i = N - 1$ и отнеся его к узлу $i = N - 1/2$:

$$q_{N-\frac{3}{2}} \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)_{i=N-1}^{n+1} = \left(\frac{k_1(s)}{k_1(s) + k_2(s)} \right)_{N-\frac{1}{2}}^{n+1} + h \left(\frac{s_{N-1}^{n+1} - s_{N-1}^n}{\tau} + \left(\frac{\partial k_1(s) \partial p / \partial x}{\partial x} \right)_{i=N-\frac{1}{2}}^{n+1} \right)$$

Этот способ позволяет раскрыть неопределенность 0^∞ , и тем самым корректно учесть так называемый "концевой" эффект, избежав при этом "градиентной катастрофы".

3. Тестирование схемы. Для тестирования полученной схемы зададим следующие параметры задачи [2]:

$$m = 0,375, \quad k = 3,06 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2, \quad \eta_1 = 9,28 \cdot 10^{-3} \text{ Пз}, \quad \eta_1 = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ Пз}, \quad \sigma \cos \theta = 0,8 \text{ кг} / \text{с}^2, \\ Q_0 = 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$k_w(s) = \begin{cases} 1, & 0 < s \leq 0,2 \\ \left(\frac{0,8-s}{0,6} \right)^3, & 0,2 \leq s \leq 0,8 \\ 0, & 0,8 \leq s < 1 \end{cases}, \quad k_o(s) = \begin{cases} 1, & 0 < s \leq 0,2 \\ \left(\frac{s-0,2}{0,8} \right)^3, & 0,2 \leq s \leq 0,8 \\ 0, & 0,8 \leq s < 1 \end{cases}$$

$$P_k(s) = \left(\frac{0,072}{s} - \frac{s}{2} + 0,391 \right) \sqrt{\frac{m}{k}} \sigma \cos \theta.$$

Начальные условия $t=0$: $s_0(x) = 0,25$, $p_0(x) = 0,55$. Граничные условия $x=0$: $s^0(0,t) = 0,8$, $p^0(0,t) = 1$; $x=1$: $p = 0,3$. Расчетные параметры: число точек на отрезке $0 \leq x \leq 1$ $n=100$, шаг по времени $\tau = 0,0001$.

Результат расчета системы (7) по предложенной схеме приведен на рис. 1.

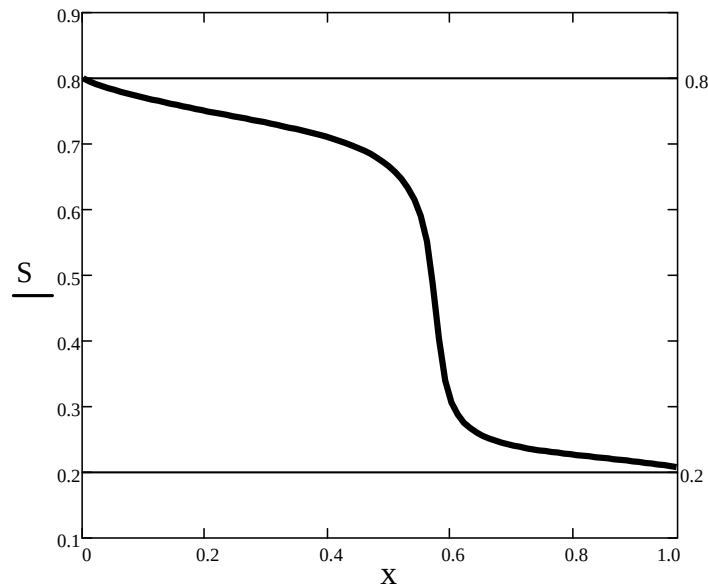


Рис. 1. Распределение водонасыщенности на момент безразмерного времени 0,2

Закключение. Приведенное численное решение задачи Маскета-Леверетта позволяет учесть влияние капиллярного запираания нефти в целике, так называемый “концевой эффект”. В отличие от ранее рассмотренной нами задачи [5], где в рамках модели Бакли-Леверетта была предпринята попытка учета влияния вибрации, как вариации давления и водонасыщенности на нагнетательной стороне целика, в настоящей статье удалось учесть влияние капиллярных сил, однако не удалось рассмотреть нестационарную задачу фильтрации. Приведенная методика, после соответствующего определения граничных условий, позволит рассмотреть в дальнейшем нестационарную задачу фильтрации, где основным упор будет делаться на преодоление капиллярного запираания нефти на добывающей стороне путем вибровоздействия на призабойную зону.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данаев Н.Т., Корсакова Н.К., Пеньковский В.И. Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов. – А-Ата, КНУ, 2005. 180 с.
2. Коновалов А.Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. – Новосибирск, Наука, 1988. 166 с.
3. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М., Недра, 1993. 415 с.
4. Коновалов А.Н. Метод расщепления по физическим процессам в задачах фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости // Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости: Тр. Всесоюз. семинар, Новосибирск, 1971. – С. 119–122.
5. Численное решение задачи нестационарной фильтрации несмешивающихся жидкостей в трещиновато-блочной среде / Д. С. Евстигнеев, Б. Ф. Симонов, А. В. Савченко, В. И. Пеньковский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013.
6. Симонов Б.Ф., Савченко А.В., Евстигнеев Д.С. Численное решение задачи стационарной фильтрации в блочно-построенном коллекторе. / Тр. конференции "Горняцкая смена 24–26 июня 2013 года". – Новосибирск. 2013.

© Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко, 2014

ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОНАЧАЛЬНО АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ В ЗАДАЧЕ О ЕЕ СДВИГЕ ЖЕСТКИМ ОТВАЛОМ

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 научной работе, тел. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Лариса Леонидовна Ефименко

Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, тел. (383)224-27-31, e-mail: efimenko.larisa@gmail.com

Ольга Анваровна Лукьяшко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер лаборатории разрушения горных пород, тел. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

Пластическое деформирование среды связывается с законами ее упругости. Предполагается, что собственные векторы матрицы упругих жесткостей (податливостей) совпадают с собственными векторами матриц соответствующих жесткостей (податливостей) пластичности, разрушения. На этом пути строятся определяющие соотношения пластичности. В качестве приложения рассматривается задача о пластическом сдвиге первоначально анизотропного грунта жестким отвалом.

Ключевые слова: анизотропия, пластичность, определяющие соотношения, жесткий отвал, предельная нагрузка.

PLASTIC-RIGID MODEL OF THE INITIALLY ANISOTROPIC MEDIUM IN THE PROBLEM ON SHEARING OF THE MEDIUM BY THE RIGID DOZER BLADE

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Physics and Mathematics, Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Larisa L. Efimenko

Novosibirsk State University of Economics and Management, 630099, Russia, Novosibirsk, 52 Kamenskaya St., PhD Physics and Mathematics, Assistant Professor, Chair of Higher Mathematics, tel. (383)224-27-31, e-mail: efimenko.larisa@gmail.com

Olga A. Lukyashko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Engineer, tel. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

Plastic deformation of a medium is related with the medium elasticity laws. It is assumed that eigenvectors of matrix of elastic rigidities (yielding) coincide with eigenvectors of matrices of the corresponding rigidities (yielding) of plasticity and failure. The constitutive equations of plasticity

are constructed. By way of application, the authors consider the problem on plastic shearing of initially anisotropic soil by rigid dozer blade.

Key words: anisotropy, plasticity, constitutive equations, rigid blade, ultimate load.

В теории пластичности широко развиты решения о вдавливании жесткого штампа и о внедрении жесткого клина [1]. Как правило, эти решения рассматриваются в рамках осесимметричных постановок. Ниже предлагается решить неосесимметричную задачу – о пластическом сдвиге жестким отвалом некоторого слоя с высотой H первоначально анизотропной породы. При этом предполагается учесть трение на контакте «отвал – порода».

Будем рассматривать некоторую упрощенную постановку. Пусть в системе координат $xOyz$ выполняется условие $\varepsilon_z = 0$ (плоская деформация). При этом будем считать известной (из каких-то общих соображений) функцию изменения напряжений σ_z от напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$, гарантирующую выполнение условия плоской деформации.

Далее для компонент напряжений и деформаций в плоскости xOy строим двумерные аналоги тензоров напряжений и деформаций T_σ и T_ε :

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix}, T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Соотношения между тензорами T_σ и T_ε в упругости зададим в виде:

$$\begin{cases} \sigma_x = a_{11}\varepsilon_x + a_{12}\varepsilon_y, \\ \sigma_y = a_{12}\varepsilon_x + a_{22}\varepsilon_y, \\ \tau_{xy} = a_{33}\varepsilon_{xy}, \end{cases} \quad (2)$$

где a_{ij} - известные из экспериментов константы, характеризующие жесткости среды в тех или иных направлениях.

Введем в рассмотрение тензорный базис с ортами

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, T_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, T_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Эти тензоры ортогональны и имеют единичную длину.

Координаты тензоров T_σ, T_ε в этом базисе обозначим как $S_1^0, S_2^0, \dots, \Omega_3^0$.

Имеем

$$S_1^0 = \sigma_x, S_2^0 = \sigma_y, \dots, \Omega_3^0 = \sqrt{2}\varepsilon_{xy}.$$

Закон Гука тогда может быть записан в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} S_1^0 \\ S_2^0 \\ S_3^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{12} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega_1^0 \\ \Omega_2^0 \\ \Omega_3^0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Найдем собственные числа и собственные векторы матрицы жесткостей в (4). Имеем характеристическое уравнение $|A - \alpha E| = 0$, корни которого равны

$$\lambda_1 = \frac{a_{11} + a_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{a_{11} - a_{22}}{2}\right)^2 + a_{12}^2},$$

$$\lambda_2 = \frac{a_{11} + a_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{a_{11} - a_{22}}{2}\right)^2 + a_{12}^2}, \quad \lambda_3 = a_{33}.$$

Собственные векторы имеют вид:

$$\vec{b}_1 = (\cos \alpha, \sin \alpha, 0), \quad \vec{b}_2 = (-\sin \alpha, \cos \alpha, 0), \quad \vec{b}_3 = (0, 0, 1),$$

где $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}}$ (для первоначально изотропного тела $a_{11} = a_{22}$ и угол $\alpha = \pi/4$). Деформационные кривые $S_1 = S_1(\Omega_1), S_2 = S_2(\Omega_2), S_3 = S_3(\Omega_3)$ представлены на рис. 1.

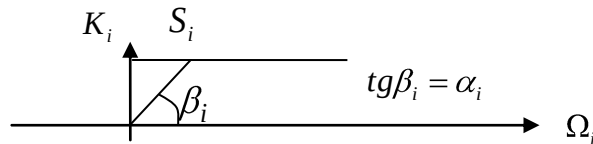


Рис. 1. Кривые $S_i = S_i(\Omega_i)$ ($i = 1, 2, 3$) деформирования в упругости и в пластичности, тангенс угла β_i совпадает с собственным значением λ_i

В дальнейшем используется следующая гипотеза: собственные векторы матрицы упругих жесткостей (податливостей) остаются собственными и для неупругих деформаций (или их приращений), то есть для матриц неупругих жесткостей (податливостей). Она подтверждается обработкой многочисленных экспериментальных данных как для первоначально изотропных сред, так и для первоначально анизотропных [2]. В ее основе лежит «единая» структура среды (блочная феноменологическая структура), которая не зависит от вида деформа-

ций (упругость, неупругость), для которой законы упругости и неупругости являются лишь ее откликами при том или ином виде нагружения.

Критерии пластичности при этой гипотезе зависят от кратности собственных чисел [3]. Если все числа различные, то они имеют вид:

$$|S_1| = K_1, |S_2| = K_2, |S_3| = K_3, \quad (5)$$

где K_1, K_2, K_3 – количественные величины, определяющие указанные критерии пластичности.

Для решения исходной задачи рассмотрим два условия пластичности: одно, связанное с величиной S_2 :

$$|S_2| = |-\sigma_x \sin \alpha + \sigma_y \cos \alpha| = K_2, \quad K_2 = \text{const}; \quad (6)$$

другое, связанное с величиной S_3 :

$$|S_3| = \sqrt{2} |\tau_{xy}| = K_3, \quad K_3 = \text{const}. \quad (7)$$

Отметим, что в случае $\alpha = \pi/4$ условие (6) переходит в условие типа условия Треска:

$$|\sigma_y - \sigma_x| = \sqrt{2} K_2,$$

другое связано со скольжением вдоль координатных плоскостей. Добавляя к критериям пластичности (6), (7) уравнения равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \end{cases}$$

получаем в том и другом случаях статистически определяемые задачи. В первом случае характеристики и соотношения на них имеют вид:

для одного семейства:

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\tan \alpha}, \quad \sigma_y + \tau_{xy} \sqrt{\tan \alpha} = \text{const}, \quad (8)$$

для другого:

$$\frac{dy}{dx} = -\sqrt{\tan \alpha}, \quad \sigma_y - \tau_{xy} \sqrt{\tan \alpha} = \text{const}. \quad (9)$$

Напряжение σ_x вычисляется из (6), при этом

$$\sigma_x = \pm \frac{K_2}{\sin \alpha} + \sigma_y \operatorname{ctg} \alpha. \quad (10)$$

Во втором случае имеем следующие выражения

$$\tau_{xy} = \pm \frac{K_2}{\sqrt{2}}, \quad \sigma_x = f(y), \quad \sigma_y = \varphi(x), \quad (11)$$

где f, φ - некоторые функции координат y, x соответственно (характеристиками здесь являются линии $y = \text{const}$, $x = \text{const}$).

Обратимся теперь к постановке и решению задачи. Имеем рис. 2, где в виде отрезка OD изображен отвал, наклоненный к оси абсцисс под углом ψ .

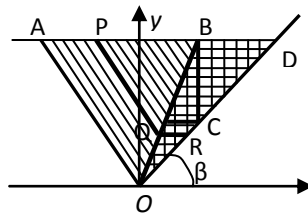


Рис. 2. Отвал OD и пластические зоны среды AOB и BOD при сдвиге

Здесь же на этом рисунке в виде треугольника AOB изображено поле характеристик, соответствующее уравнениям (8), (9). Прямые линии, параллельные осям координат Ox, Oy , отвечают характеристикам (11). На отрезке AD напряжения σ_y, τ_{xy} равны нулю. Рассмотрим напряженное состояние в треугольнике AOB . Используя (8), (9), замечаем, что во всем треугольнике реализуется однородное напряженное состояние такое, что

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0, \quad \sigma_x = -\frac{K_2}{\sin \alpha}, \quad (12)$$

где K_2 - характеристика материала, имеющая положительное значение, знак минус указывает на то, что здесь происходит сжатие.

Рассмотрим линию OB . Обозначим угол, образуемый OB с осью Ox как χ . Тогда косинус между нормалью к OB и осью Ox будет равен: $\cos(n, x) = -\sin \chi$, а косинус между нормалью и осью Oy будет следующим: $\cos(n, y) = \cos \chi$. Запишем теперь третий закон Ньютона (сила действия равна силе противодействия) на линии OB . Имеем

$$\begin{cases} -\sigma_x^+ \sin \chi + \tau_{xy}^+ \cos \chi = -\sigma_x^- \sin \chi + \tau_{xy}^- \cos \chi, \\ -\tau_{xy}^+ \sin \chi + \sigma_y^+ \cos \chi = -\tau_{xy}^- \sin \chi + \sigma_y^- \cos \chi, \end{cases}$$

где значком «+» отмечены величины точек среды левее линии OB , значком «-» – правее. В силу того, что слева от OB $\tau_{xy}^+ = \sigma_y^+ = 0$, то в итоге находим соотношения

$$\begin{cases} \sigma_x^- = \tau_{xy}^- \sqrt{ctg \alpha} + \sigma_x^+, \\ \sigma_y^- = \sqrt{tg \alpha} \tau_{xy}^-. \end{cases}$$

Учитывая (12), (11), получаем, что во всем треугольнике OBD

$$\sigma_x^- = -\frac{K_2}{\sin \alpha} - \frac{K_3}{\sqrt{2}} \sqrt{ctg \alpha}, \quad (13)$$

а в треугольнике OBC

$$\sigma_y^-|_{OC} = -\frac{K_3 \sqrt{tg \alpha}}{\sqrt{2}}. \quad (14)$$

С другой стороны в силу (11) в треугольнике BCD

$$\sigma_y^-|_{CD} = 0, \quad (15)$$

то есть линия BC является линией разрыва тангенциального к ней напряжения σ_y . Полученные напряжения (13)-(15) определяют предельную горизонтальную и вертикальную силы, необходимые для сдвижения представленной на рис.2 массы первоначально анизотропной среды. Есть еще один случай, исследуемый в работе, когда отвал находится в пределах треугольника AOB . Здесь также может быть получена предельная нагрузка в зависимости от свойств среды и коэффициента трения на контакте «порода-инструмент».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качанов Л. М. Основы теории пластичности // М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. Литературы, 1969. 420с.
2. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов / Справочник. Изд.2, перераб. и доп. 1980, 248 с.
3. Чанышев А.И. О пластичности анизотропных сред // ПМТФ. 1984.-№2

© А. И. Чанышев, Л. Л. Ефименко, О. А. Лукьяшко, 2014

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ РАДИУСА ПОВОРОТА РАБОЧЕГО ОРГАНА ПРИ НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией подземной строительной геотехники и геотехнологий, тел. (383)217-01-33, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Дмитрий Олегович Чецин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)217-01-33, e-mail: dimixch@mail.ru.

Рассматривается возможность уменьшения радиуса поворота рабочего органа за счет его подвижного соединения с буровой колонной при направленном бурении скважин. Приведены результаты испытаний конструкции соединительного узла рабочего органа с буровой колонной. Дана количественная оценка достигаемой величины отклонения оси скважины.

Ключевые слова: буровая колонна, угловая подвижность, отклонение траектории, скважина, направленное бурение.

EVALUATION OF THE GUIDED DRILLING MEMBER TURN TIGHTENING POTENTIAL

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Underground Construction Geotechnics and Geotechnology, tel. (383)217-01-33, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Dmitry O. Cheshchin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)217-01-33, e-mail: dimixch@mail.ru

The article discusses the option of tightening of the drilling member turn using movable coupling of the drilling member and the guided drill string. The test data of the drilling member and drill string coupling design are presented. The drill hole deviation is evaluated.

Key words: drill string, angular movability, drill hole deviation, guided drilling.

В настоящее время одним из перспективных методов образования вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин в грунте является метод бурения. В последнее время интенсивное развитие получило направленное бурение, в процессе которого осуществляется корректировка направления скважин. Таким методом бурят направленные скважины в угольных пластах (например, для отвода метана), при разработке нефтяных месторождений, при строительстве коммуникаций различного назначения.

Скважины, сооруженные методом направленного бурения имеют, как правило, более высокую производительность по сравнению с вертикальными

скважинами. Использование горизонтального бурения позволяет достигать нефтеносных слоев, расположенных за несколько километров от точки бурения. Это особенно важно для месторождений, где вертикальное бурение затруднено из-за условий рельефа или может значительно навредить экологии. Благодаря такому методу бурения сохраняется природный ландшафт и экологический баланс в местах проведения работ, исключается техногенное воздействие на флору и фауну, а также минимизируется негативное влияние на условия проживания людей в этой зоне.

Первоочередными объектами использования направленных скважин являются морские месторождения углеводородов; месторождения на территории с ограниченной возможностью ведения буровых работ; залежи высоковязкой нефти при естественном режиме фильтрации; низкопроницаемые, неоднородные пласты-коллекторы малой мощности; карбонатные коллекторы с вертикальной трещиноватостью; переслаивающиеся залежи нефти и газа; залежи на поздней стадии разработки. Вскрытие продуктивной толщи направленными, в том числе горизонтальными и разветвленно-горизонтальными скважинами, позволяет повысить продуктивность скважины за счет увеличения площади фильтрации; продлить период безводной эксплуатации скважин; увеличить степень извлечения углеводородов на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки; повысить эффективность закачки агентов в пласты; вовлечь в разработку пласты с низкими коллекторскими свойствами и с высоковязкой нефтью; освоить труднодоступные нефтегазовые месторождения; улучшить технологию подземных хранилищ газа. Кроме совершенствования технологии разработки нефтяных и газовых месторождений направленные или горизонтальные скважины эффективны во многих других случаях: при бурении в обход осложненных зон горных пород; при бурении под недоступные или занятые различными объектами участки земной поверхности; при глушении открытых фонтанов; при вскрытии крутопадающих пластов и т.д. [1].

Применение направленного бурения в строительстве позволяет избежать повреждений дорожного полотна, существующих инженерных коммуникаций. Проведение таких работ в городских условиях позволяет не нарушать привычный ритм жизни горожан, сохранить благоустройство территории, зеленые насаждения, а также не нарушать природный окружающий ландшафт [2].

Для выхода скважины в заданную точку подземного пространства разрабатываются различные способы управления рабочим органом. В установках ГНБ наиболее часто применяется ассиметричный клин в передней части рабочего органа. Основным показателем маневренности бурового рабочего органа является радиус изгиба буровой колонны. При резьбовом соединении буровых штанг величина их изгиба будет ограничена зоной упругого деформирования материала, из которого они изготовлены.

Для уменьшения радиуса поворота рабочего органа при направленном бурении в ИГД СО РАН разработана новая конструкция буровых штанг с кулачковым соединением [3]. Уменьшение радиуса обеспечивается за счет некоторой угловой подвижности в соединениях звеньев буровой колонны.

Для оценки влияния этой подвижности на радиус кривизны были проведены экспериментальные исследования. Задача первого этапа заключалась в определении величины угла поворота штанг под действием силы тяжести без приложения внешней силы. На подготовительном этапе проводилось соосное выравнивание платформы бурового станка с грунтовым каналом. Затем к вращателю бурового станка через переходник поочередно подсоединялись штанги и рабочий орган (рис. 1). После каждого наращивания буровой колонны производилось измерение расстояния от конца штанг до плоскости платформы и угла наклона оси штанг. Это позволило оценить подвижность соединительных узлов штанг под действием нагрузки от собственного веса без приложения внешних сил. Среднее значение угла наклона между двумя соседними штангами составило $0,3^\circ$.

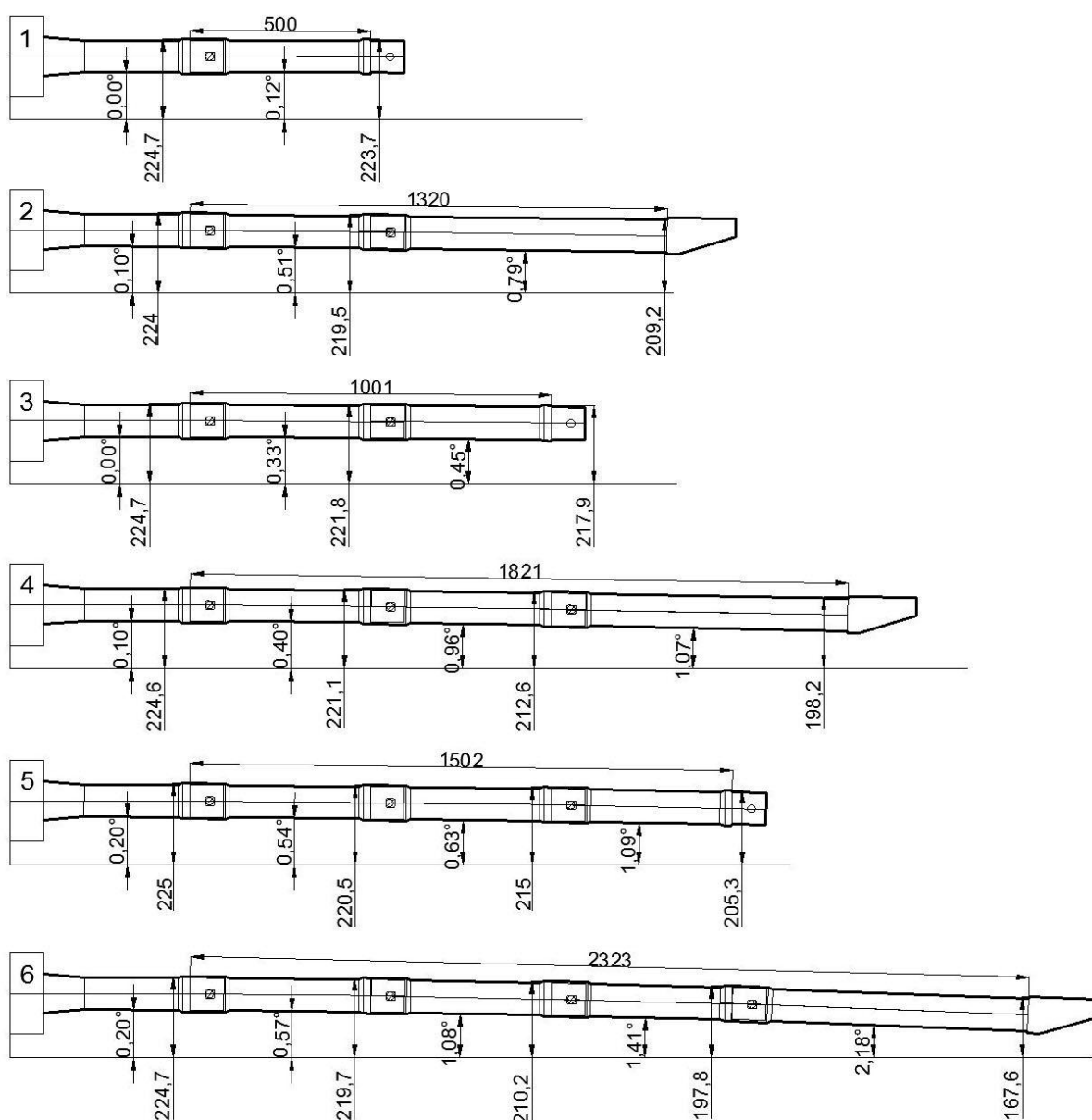


Рис. 1. Положение штанг при нагрузке от собственного веса

Второй этап исследований ставил перед собой задачу оценки угла поворота штанг непосредственно в грунтовом канале. Для этого рабочий орган, внутри которого находится передатчик для определения местоположения и пространственной ориентации, забуривался в грунтовый канал с вращением вокруг своей продольной оси для сохранения его горизонтального положения. Затем клин устанавливался плоскостью вниз (то есть, в положение, соответствующее отклонению рабочего органа вверх), и производилось дальнейшее внедрение рабочего органа в грунт без вращения. При этом производилась пошаговая регистрация данных об изменении пространственной ориентации рабочего органа с помощью навигационного устройства (рис. 2). Дополнительная проверка этих данных производилась путем измерения глубины залегания рабочего органа на каждом участке при помощи металлического шомпола, вертикально внедряемого в грунт сверху до соприкосновения с рабочим органом.

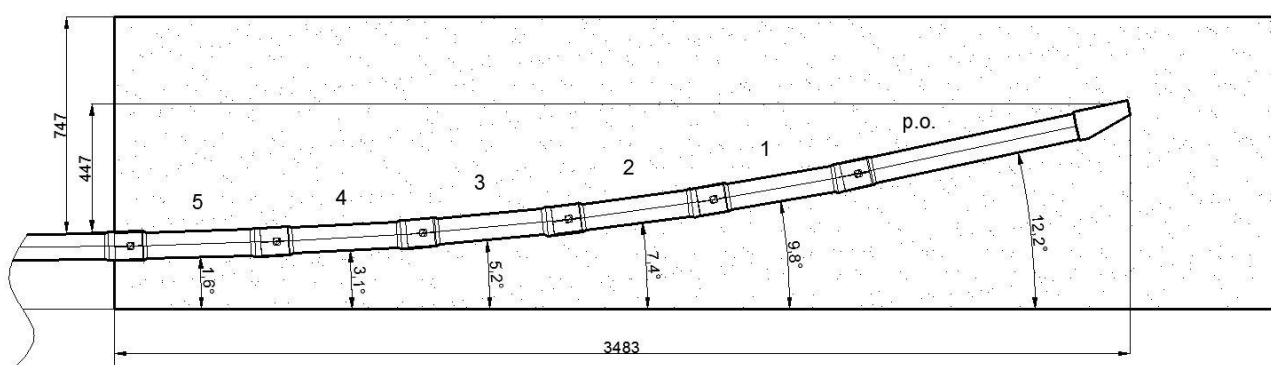


Рис. 2. Положение штанг в грунтовом канале при изменении траектории скважины

В результате установлено, что за счет конструктивных мер, обеспечивающих угловую подвижность в соединениях буровых штанг, достигнуто уменьшение радиуса кривизны траектории скважины более чем в два раза по сравнению с жестким неподвижным соединением. Угол поворота инструмента достигает значения более 4° на одном метре длины скважины. Величина изгиба буровых штанг с резьбовым соединением, ограничена зоной упругого деформирования материала, из которого они изготовлены и, как правило, составляет 2° на метре длины.

Задача третьего этапа исследования заключалась в оценке суммарной величины отклонения буровой колонны, обусловленного конструктивными особенностями и упругой деформацией.

Для этого буровая колонна устанавливалась в исходное положение (рис. 3, III). Затем рабочий орган подвешивался через динамометр к кран-балке и производился подъем колонны. Регистрировались значения динамометра и величины отклонения рабочего органа, при котором: обеспечивается изгиб колонны за счет подвижности в соединениях (рис. 3, II); обеспечивается изгиб колонны

за счет возникновения дополнительной упругой деформации (рис. 3, I). Разность этих величин дает значение силы создающей упругую деформацию.

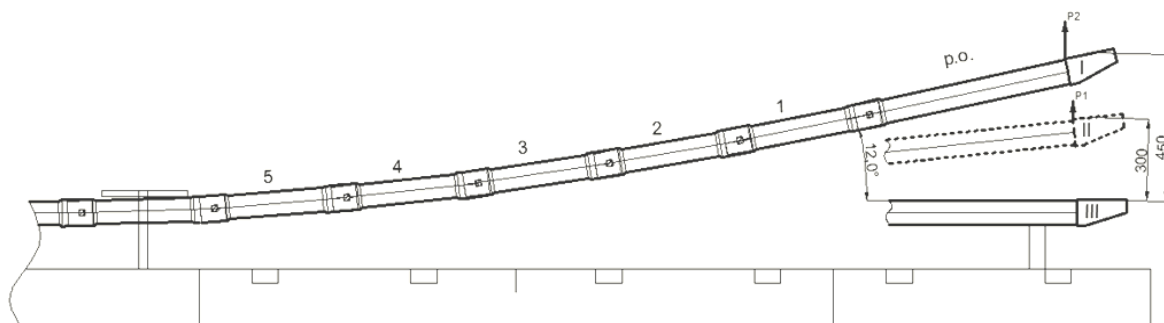


Рис. 3. Положение буровой колонны при имитации отклоняющего усилия

Среднее отклонение от первоначального направления пневмопробойника ИП 4603 при проходке скважин длиной до 40 м составляет около 250 мм. В результате измерений установлено, что суммарное отклонение оси буровой колонны за счет подвижного соединения звеньев и их упругого деформирования составило 60 мм на 1 м ее длины. В большинстве случаев этого достаточно для решения практических задач [4].

Несомненным достоинством рассмотренного вида подвижного соединения штанг по сравнению с резьбовым соединением, является возможность производить вращение буровой колонны в обе стороны. Эта возможность позволяет уменьшить отклонение скважины, возникающее при одностороннем вращении. Кроме того обратное вращение может использоваться для передачи какого – либо дополнительного управляющего воздействия на рабочий орган.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапенко А. Особенности горизонтального бурения [Электронный ресурс]/ А. Потапенко. – Режим доступа: <http://www.tehsovet.ru/article-2012-12-3-1468>
2. Бурение горизонтальных скважин с применением технологии ГНБ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://otoplenie72.ru/mag/general_info/96.html
3. Пат. 2344241 Российская Федерация, МПК E21B17/046. Кулачковое соединение буровых штанг / Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Сырямин Н.Д., Фетисов С.Ю.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела СО РАН. – № 2012119057/03; заявл. 10.05.2012; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.
4. Гурков К.С. Пневмопробойники: монография / К.С. Гурков., В.В. Климашко, А.Д. Костылев, В.Д. Плавских и др. – Новосибирск: Институт горного дела СО АН СССР, 1990. – 217 с.

© Б. Б. Данилов, Д. О. Чещин, 2014

ЗАДАЧА ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ (ПЛОСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ)

Анвар Исмагилович Чанышев

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, тел. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyшев@gmail.com

Михаил Николаевич Петров

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, тел. (383)335-97-50, e-mail: petrovmn.93@mail.ru

Рассматривается динамическая задача для полупространства с неизвестным источником возмущения внутри. На поверхности полупространства во времени измеряются вертикальное и два горизонтальных смещения. При известных значениях упругих характеристик среды определяются положение источника и интенсивность его действия. Приводится пример решения задачи.

Ключевые слова: уравнения упругости, источник возмущения, задача Коши.

PROBLEM ON LOCATION OF DYNAMIC EXCITATION SOURCE BY USING SURFACE DISPLACEMENT MEASUREMENTS

Anvar I. Chanyшев

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Physics and Mathematics, Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyшев@gmail.com

Mikhail N. Petrov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Student, tel. (383)335-97-50, e-mail: petrovmn.93@mail.ru

The authors solve the dynamic problem on a half-space with an unknown excitation source inside it. The displacement of the half-space surface in one vertical and two horizontal directions is measured. With the known elastic characteristics of the medium, it is possible to locate the excitation source and to estimate its intensity.

Key words: Cauchy problem, dynamics, half-space, excitation source.

Рассматривается задача об источнике динамического возмущения земной поверхности. Смысл задачи следующий: есть заглубленный в землю источник, который посылает сигналы, на поверхности земли есть приемники, измеряющие смещения в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Известны не только точечные измерения смещений, известны смещения как функции координат земной поверхности x, y и времени t . В предположении, что поверхность земли свободна от напряжений, требуется определить координаты источника,

интенсивность его возмущения и, кроме того, характеристики его движения, если есть, например, движущийся пробойник в грунте и требуется найти его положение. Относительно среды предполагается, что известна её плотность, все константы упругости (модуль Юнга, коэффициент Пуассона).

Отметим, что решению поставленной задачи посвящено множество работ, например [1-2], но все они в какой-то степени рассматривают предложенную ситуацию как обратную задачу. То есть имеют в виду фиксированный источник, его интенсивность, затем происходит подбор указанных параметров так, чтобы вычисленные смещения на поверхности земли совпадали бы с экспериментально измеренными, для этого применяется метод наименьших квадратов. Изложенную здесь ситуацию мы изучаем не как обратную, а как задачу Коши. В чем суть этой постановки и каков метод её решения, поясним на следующем упрощенном примере. Будем рассматривать не пространственную картину, а случай плоской деформации. В системе координат xOy , имеем границу с уравнением $y=0$, на которой заданы нормальное напряжение σ_y , касательное τ_{xy} , нормальное смещение u_y , касательное u_x . Все эти величины считаются заданными функциями координаты x и времени t :

$$\sigma_y = \sigma_y(x, t), \tau_{xy} = \tau_{xy}(x, t), u_y = u_y(x, t), u_x = u_x(x, t). \quad (1)$$

Для решения задачи имеем: уравнения равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (2)$$

соотношения закона Гука:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y], \\ \sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu\varepsilon_x + (1-\nu)\varepsilon_y], \\ \tau_{xy} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{xy}, \end{cases} \quad (3)$$

соотношения Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Задачу будем решать конечно-разностным методом. Вычисления начнем вести с границы $y = 0$, углубляясь вниз. Пусть время соответствует некоторому значению t_0 . Для этого времени на всей границе известны ускорения $\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}$. Прежде всего определим все основные величины на границе $y = 0$. Поскольку из (1) на границе $y = 0$ известно перемещение u_x , то в силу первого соотношения (4) на этой границе в момент времени t_0 становится известной деформация ε_x . Поскольку при $y = 0$ известно напряжение σ_y , то в силу второго соотношения (3) на этой границе становится известной деформация ε_y . Далее, в силу первого соотношения (3) при известных деформациях $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ становится известным напряжение σ_x . В силу первого соотношения (3) при известном напряжении τ_{xy} при $y = 0$ становится известной деформация ε_{xy} . Время t здесь пока всюду фиксировано и равно t_0 . Это означает, что на границе $y = 0$ становятся известными все величины – все компоненты тензора напряжений - $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, все компоненты тензора деформации - $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$, неизвестной остается только величина поворота:

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Однако и она определяется в силу того, что на границе $y = 0$ будет известной производная $\frac{\partial u_y}{\partial x}$, а это означает в силу определения деформации ε_{xy} , что становится известной производная: $\frac{\partial u_x}{\partial y} = 2\varepsilon_{xy} - \frac{\partial u_y}{\partial x}$. Отсюда, зная $\frac{\partial u_y}{\partial x}, \frac{\partial u_x}{\partial y}$, находим при $y = 0$ искомую компоненту вектора поворота ω_z . Следующий шаг – опускаемся на величину h по оси y вниз. Для этого нам потребуются уравнения (1). Поскольку известны зависимости $u_y = u_y(x, t), u_x = u_x(x, t)$, то на границе $y = 0$ находим вторые производные от этих функций по времени t . В конечно-разностном виде имеем:

$$\left. \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right|_{t=t_0+n\tau} = \frac{u_x^{n+1} - 2u_x^n + u_x^{n-1}}{\tau^2}, \left. \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \right|_{t=t_0+n\tau} = \frac{u_y^{n+1} - 2u_y^n + u_y^{n-1}}{\tau^2}. \quad (6)$$

Теперь обратимся к первому уравнению (2). Поскольку известно напряжение σ_x при $y = 0$, то известна производная $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$ в момент времени $t = t_0$. Из

первого уравнения (2) находим $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$ и, поскольку τ_{xy} известно при $y = 0$, находим τ_{xy} на слое $y = -h$ для времени $t = t_0$. Рассматривая аналогично второе уравнение (2), находим σ_y на слое $y = -h$ для времени $t = t_0$. Из определения деформации ε_y (вторая формула (4)) находим смещение u_y на слое $y = -h$ в момент времени $t = t_0$. Из определения деформации ε_{xy} (третья формула (4)) через производную $\frac{\partial u_y}{\partial x}$ на границе $y = 0$ находим смещение u_x на слое $y = -h$. Теперь на слое $y = -h$ уже становятся известными величины $\sigma_y, \tau_{xy}, u_x, u_y$ и ситуация повторяется. По первой формуле (4) находим деформацию ε_x . По второй формуле (3) находим при известном σ_y величину ε_y , затем σ_x . Далее находим деформацию ε_{xy} и величину поворота ω_z при $y = -h$.

Точно также поступаем и для других времен. То есть считаем на слое $y = -h$ все компоненты тензоров напряжений и деформаций в моменты времени $t = t_0 + \tau, t = t_0 + 2\tau \dots t = t_0 + n\tau$.

Дальнейшая задача – опуститься на слой $y = -2h$. Здесь мы должны опять использовать уравнения равновесия (2). На слое $y = -h$ имеем смещения u_x в моменты времени $t = t_0 + \tau, t = t_0 + 2\tau, t = t_0 + 3\tau$ и т.д. На этом слое требуется составить вторую производную от смещения u_x . Это возможно сделать в момент времени $t = t_0 + \tau$:

$$\left. \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right|_{t=t_0+\tau} = \frac{u_x^2 - 2u_x^1 + u_x^0}{\tau^2}.$$

Следовательно, для слоя $y = -h$ мы должны брать все напряжения, деформации, отнесенные к моменту времени $t = t_0 + \tau$. Поскольку известно напряжение σ_x при $y = -h$, то известна производная $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$ в момент времени $t = t_0 + \tau$.

Из первого уравнения (2) находим $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$ и, поскольку τ_{xy} известно при $y = -h$, находим τ_{xy} на слое $y = -2h$ для времени $t = t_0 + \tau$. Аналогично предыдущему находим все величины $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy})$, включая u_x, u_y, u_z на этом слое. Повторяем все эти расчеты для всех других времен. Далее опускаясь на слой $y = -3h$ мы также должны определить вторые производные от u_x, u_y по времени t в момент времени $t = t_0 + 2\tau$. На слое $y = -2h$ составляем производную

$$\left. \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right|_{t=t_0+2\tau} = \frac{u_x^3 - 2u_x^2 + u_x^1}{\tau^2}.$$

Процесс таким образом повторяется. Для проверки расчетной схемы был составлен следующий тест: пусть в начале системы координат x_0y_0 имеется цилиндрический источник возмущения. Закон деформирования среды вокруг источника описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (7)$$

где $a^2 = \frac{(1-\nu)E}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}$, ρ – плотность, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Решение (7) отыскиваем методом разделения переменных:

$$u = f(r)g(t). \quad (8)$$

Подставим (8) в (7), проводим преобразования и приравняем левую и правую части некоторому параметру $-\lambda^2$, получаем соответствующие уравнения для нахождения функций $f(r), g(t)$. Функция $g(t)$ имеет вид: $g(t) = C_1 \cos(a\lambda t) + C_2 \sin(a\lambda t)$. Полагая $g(t) = 0$ при $t = 0$, находим, что $C_1 = 0$ и $g(t) = C_2 \sin(a\lambda t)$. Для функции $f(r)$ получаем дифференциальное уравнение Бесселя $r^2 f''(r) + rf'(r) + (\lambda^2 r^2 - 1)f(r) = 0$, общее решение которого есть линейная комбинация двух функций Бесселя 1-го и 2-го родов.

Для анализа возьмем функцию смещения u в виде:

$$u = C_1 J_1(\lambda r) \sin(a\lambda t), \quad (9)$$

где $J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя 1-го рода. Тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon_\varphi &= \frac{u}{r} = \lambda C_1 \sin(a\lambda t) \frac{J_1(\lambda r)}{\lambda^2}, \\ \varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} = \lambda [J_0(\lambda r) - \frac{J_1(\lambda r)}{\lambda r}] C_1 \sin(a\lambda t), \\ \sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\lambda J_0(\lambda r) - (1-2\nu)\lambda \frac{J_1(\lambda r)}{\lambda r}] C_1 \sin(a\lambda t), \\ \sigma_\varphi &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu\lambda J_0(\lambda r) - (1-2\nu)\lambda \frac{J_1(\lambda r)}{\lambda r}] C_1 \sin(a\lambda t). \end{aligned} \quad (10)$$

Задача следующая: пусть на границе $y = H$ заданы функции (10). Требуется по предложенному выше алгоритму найти распределения (9), (10) для всех значений r, φ или перейдя к декартовым координатам для x, y .

В работе создана программа численного счета, производится сравнение численного и аналитического решений.

Таким образом, разработан алгоритм решения динамической задачи по определению источника возмущений по заданным напряжениям и смещениям на границе тела. Построен тестовый пример, проведено сопоставление расчетных и аналитических зависимостей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. 2 изд. Новосибирск: Сибирское Научное Издательство 2009.
2. Тимофеев В. Ю. Использование космических технологий (GPS) для изучения движений Горного Алтая [Текст]/ В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков [и др.]// Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: материалы 2-го междунар. Симп., Новосибирск, 12 – 16 сентября, 2005. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – с.186-189

© А. И. Чанышев, М. Н. Петров, 2014

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НДС МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

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, тел. (383)217-05-41, e-mail: kwg@ngs.ru

Рассматривается проблема надёжного измерения малых деформаций стенок скважин при продолжительных измерениях. Температурная зависимость сигналов тензоизмерительных систем является определяющей среди всех возможных случайных и детерминированных воздействий на точность и надёжность измерения малых перемещений. Предложен комплекс мер по компенсации влияния температуры на результаты опытных исследований в условиях как внешнего, так и внутреннего температурного влияния на тензодатчики деформометра и измерительного канала.

Ключевые слова: деформометр, тензодатчик, дрейф, температурная компенсация.

SOFTWARE AND EQUIPMENT SUPPORT OF FIELD RESEARCHES OF ROCK MASS STRESS-STRAIN STATE BY THE METHOD OF PARALLEL HOLE DRILLING

Vladislav G. Kachalsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Engineer, Laboratory for Diagnostics of Mechanical Condition of Rocks, tel. (383)217-05-15

The article deals with reliable long-term measurement of small deformations in drill hole walls. Out of all possible random and deterministic effects exerted on the reliability and precision of the small displacement measurement, the relationship of the temperature and the strain sensor signal has the determining influence. The author offers the package of actions to balance both the internal and external temperature impact on the precision of strain sensors in the deformometer and in the hole.

Key words: deformometer, strain sensor, drift, temperature compensation.

Экспериментальные исследования напряжений, обеспечивающие получение наиболее объективных данных, имеют важное значение как для формирования параметров расчетной геомеханической модели объекта, так и для уточнения результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород и конструктивных элементов промышленных сооружений. Надёжность оценки безопасного состояния инженерных сооружений во многом определяется достоверностью информации о величинах действующих напряжений в массиве горных пород.

Процедура натурного определения напряженного состояния массива горных пород - метод параллельных скважин, а также технические и программные средства приведены в [1–5], состоящая из последовательности опытов на объекте, разработана в ИГД СО РАН. Сущность его заключается в предварительном бурении в горном массиве измерительной скважины, в которую помещается прибор (деформометр) для измерения радиальных перемещений ее стенок. После этого напряженно-деформированное состояние в окрестности измерительной скважины изменяется выбуриванием параллельной (возмущающей) скважины, что приводит к небольшим перемещениям стенок измерительной скважины. Бурение возмущающей скважины осуществляется с таким расчетом, чтобы в начальном и конечном положении торец скважины не оказывал влияние на показания деформометра. Возникающие радиальные перемещения контура измерительной скважины регистрируются по нескольким (минимум трем) направлениям и определяются разностью между начальными (до возмущения) и конечными (после возмущения) показаниями. Для определения напряжений, существующих в окрестности измерительной скважины, в возмущающей скважине “напротив” деформометра размещается нагрузочное устройство, с помощью которого нагружают равномерным давлением стенки скважины. Определяются зависимости f_i давления на стенки скважины от их перемещения по направлениям (1).

$$l_{ij} = f_i(p_j) \quad (1)$$

где l_{ij} – перемещения стенок скважин (мкм);

i – направление, $i = (1, 2, \dots, k)$, k – число направлений;

P_j – давление на стенки возмущающей скважины (МПа), $P_j = (P_{min} \dots P_{max} \dots P_{min})$.

Таким образом, информационное обеспечение должно содержать два основных источника сигналов – датчики перемещений и датчик давления. Кроме того, к числу вспомогательных источников можно отнести инклинометр, позволяющий определять и поддерживать нужное положение деформометра внутри измерительной скважины, датчик расхода жидкости в гидросистеме нагрузочного устройства, так же необходимо контролировать напряжение аккумулятора, питающего измерительное устройство. Блок – схема каналов измерения информационного обеспечения эксперимента «параллельные скважины» приведена на рис. 1.

Из перечисленных сигналов, особое внимание уделяется точности и надёжности измерения перемещений с помощью деформометра, который выполняется с применением тензодатчиков. Технология проведения эксперимента «параллельные скважины» предполагает длительное (до нескольких часов) измерение малых перемещений стенок измерительной скважины. В процессе измерения возникают температурные изменения вокруг деформометра как естественного характера, так и от использования охлаждающей жидкости при бурении параллельной возмущающей скважины.

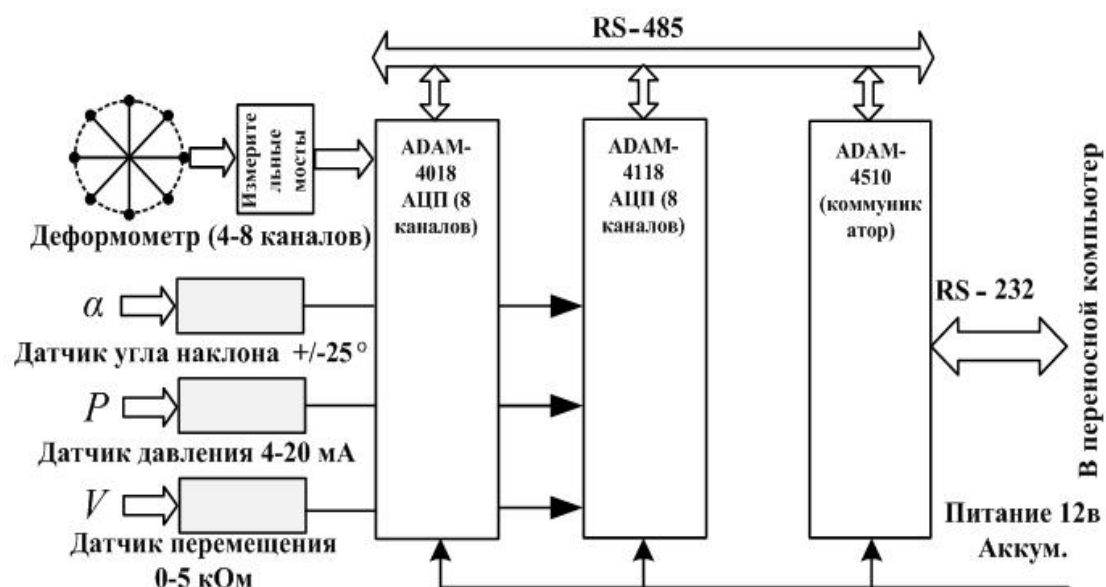


Рис. 1. Блок – схема каналов ввода сигналов в измерительном устройстве

Рассмотрим инструментальную ошибку измерения малых перемещений, связанную с температурным воздействием на измерительную систему (рис. 1).

Тензорезистивные преобразователи механических величин, в частности деформаций, используются для измерения малых перемещений. Данные преобразователи имеют следующие основные достоинства:

- сравнительно низкую стоимость; малые размеры; высокое быстродействие.

Наряду с перечисленными достоинствами они обладают рядом недостатков:

- изменение температуры окружающей среды приводит к температурному дрейфу нуля и чувствительности измерительных мостов;
- имеет место временной дрейф, обусловленный изменением номиналов резисторов измерительного моста и саморазогрев тензодатчиков.

Если во втором случае, в основном, используются различные методы старения датчиков (отжиг, электротермотренировка и т.д.), то в первом случае используются различные схемотехнические методы компенсации температурного дрейфа. Применение в измерительном канале высокочувствительных аналого - цифровых преобразователей и программного обеспечения с предварительной математической обработкой измеряемых сигналов является дополнительным средством учета температурного дрейфа.

Практическое использование тензометрических систем требует применять все доступные средства и методы компенсации и учета температурного дрейфа измерительного канала.

Рассмотрим возможность учета дрейфа тензосистемы [6] на основе опыта проведения исследований напряженного состояния на промышленном объекте.

В используемой измерительной системе был применён программный способ учета детерминированной составляющей дрейфа тензомостов деформометра и измерительной системы. Неоднократно проведенные измерения деформаций стенок скважин в процессе бурения показали (пример на графике рис. 2), что дрейф показаний измерительной схемы в конце процесса сохраняется, несмотря на хорошо сбалансированные тензометрические мосты, хотя деформационные процессы, в основном, прекратились.

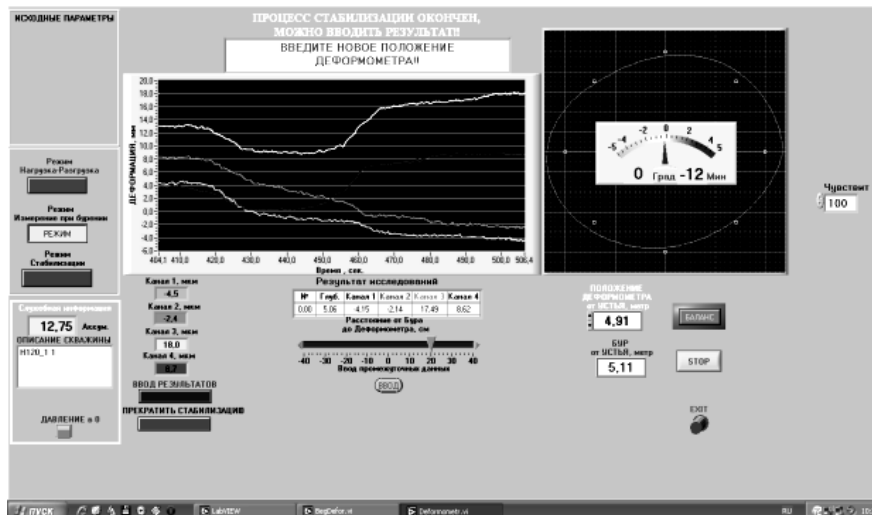


Рис. 2. Отображение процессов в измерительной скважине при бурении параллельной возмущающей скважины

В этих условиях применяется программный метод вычитания значений квазилинейного процесса саморазогрева тензодатчиков из измеряемого суммарного процесса $y_k[j]$ (2) .

$$\begin{aligned} y_{out,1}[j] &= -A_1 x[j] + y_1[j] \\ y_{out,2}[j] &= -A_2 x[j] + y_2[j] \\ &\dots\dots\dots \\ y_{out,k}[j] &= -A_k x[j] + y_k[j] \end{aligned} \quad (2)$$

где $y_{out,i}[j]$ - откорректированные отсчеты по i -му каналу измерения деформации стенок измерительной скважины, $i = 1, 2, \dots, k$;

k – число направлений измерения деформаций стенок скважины;

j – дискретное время, $j = 0, 1, \dots$;

A_i – коэффициент квазилинейной функции температурного дрейфа;

$x[j]$ - значения отсчётов времени работы системы с начала записи дрейфа, $j = 0, 1, 2, \dots, N$ – дискретное время;

N - число отсчётов временных рядов за время измерения дрейфа;

$y_k[j]$ – отсчеты по i – му каналу измерения деформации стенок измерительной скважины.

Коэффициенты A_i линейной системы (2) определяются путем аппроксимации квазилинейной функции температурного дрейфа $y[j]$ методом наименьших квадратов.

В результате применения системы (2) к данным, полученным в результате опыта бурения параллельной скважины за время до 2-х часов, удаётся повысить достоверность определения малых перемещений и уменьшить абсолютную ошибку измерения перемещений на конце интервала измерения $N \Delta y_N$ до 20%:

$$\Delta y_N = |(y_{out,i}[N] - y_k[N]) / y_k[N]|, \quad (3)$$

где Δy_N – модуль относительной ошибки измерения перемещений стенок скважины.

Величина Δy_N со своим знаком используется для коррекции опытных данных в расчётах напряжений в окрестности измерительной скважины.

Применение системы (2) к результатам измерения перемещений стенок измерительной скважины при нагружении параллельной возмущающей скважины также позволяет получить устойчивые результаты, приведённые на рис. 3.

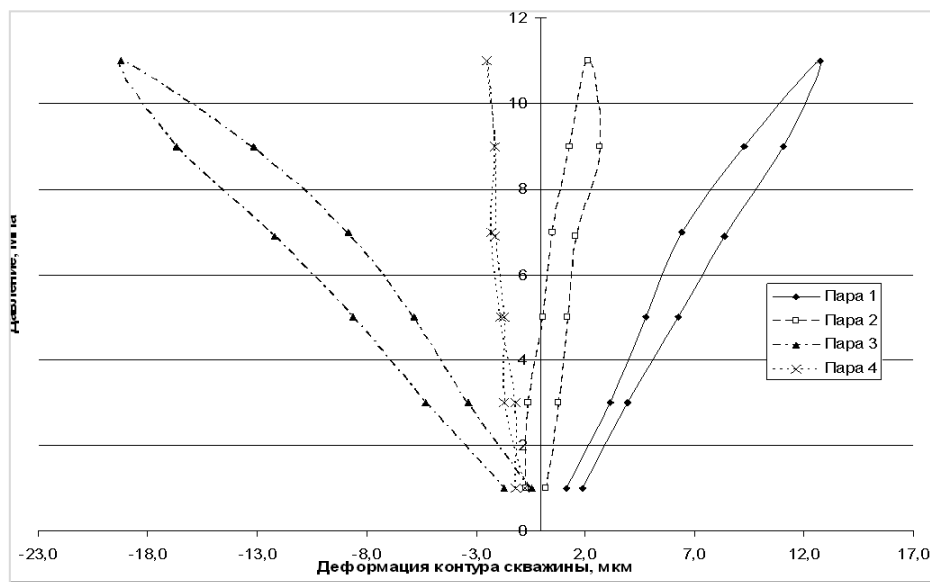


Рис. 3. Графики деформации стенок измерительной скважины по 4-м направлениям при нагрузке - разгрузке возмущающей скважины. Координата X – деформация, мкм; Y – давление в нагрузочном устройстве, МПа

Графики нагрузки-разгрузки хорошо сглажены, что можно отнести к вполне удовлетворительной работе всей измерительной системы даже при малых перемещениях $X_{max} < 20$ мкм. Метод коррекции дрейфа тензометрической измерительной системы, возникающего из-за влияния изменений температуры внешней среды и саморазогрева тензодатчиков в условиях продолжительных экспериментов, позволяет уточнить результаты измерения и получить более достоверные оценки НДС массива горных пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Барышников В.Д., Бобров Г.Ф. и др. Способ определения НДС в массиве горных пород. // Открытия и изобретения. - 1981. № 40
2. Барышников В.Д., Попов С.Н. и др. Способ натурного определения упругих свойств горных пород в методе параллельных скважин. // ФТПРПИ. -1982. №1
3. Барышников В.Д., Качальский В.Г. Автоматизированный измерительный комплекс приборов для определения напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин.// ФТПРПИ. -2010. №3. - С.115-119.
4. Колмаков В.Д. Техника экспериментального измерения напряжений методом параллельных скважин в скальных породах. // Исследование напряжений в горных породах. - Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. - С.120-126.
5. Барышников В.Д., Курленя М.В., Гахова Л.Н. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве. // Гидротехническое строительство. -1998. №9. - С.59-62.
6. Качальский В.Г. Учет температурного дрейфа измерительной системы при определении деформационных свойств горных пород. / Труды XX Всероссийской конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013.- С.213-215.

© В. Г. Качальский, 2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПО ПОВЕРХНОСТИ БЛОЧНОГО ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ СОСРЕДОТОЧЕННОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Надежда Ивановна Александрова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики взрыва, тел. (383)335-96-54, e-mail: alex@math.nsc.ru.

Мария Петровна Варыгина

Институт вычислительного моделирования СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44, кандидат физико-математических наук, тел. (3912) 43-27-56, e-mail: varyginam@yandex.ru.

Евгений Николаевич Шер

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией механики взрыва, тел. (383)335-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru.

Приведены результаты численного исследования распространения сейсмических волн в двумерной модели блочной среды. Среда моделируется квадратной решеткой масс, соединенных пружинами. Рассматривается поверхностное импульсное и ступенчатое нагружение. Рассчитаны осциллограммы перемещений и скоростей перемещений поверхностных масс. Полученные результаты сопоставляются с данными расчетов аналогичных задач в модели упругого тела.

Ключевые слова: блочная среда, сейсмическая волна, задача Лэмба, импульсное нагружение.

SIMULATION OF SEISMIC WAVE PROPAGATION OVER THE SURFACE OF A BLOCKY ROCK MASS UNDER THE PIN IMPULSIVE LOADING

Nadezhda I. Aleksandrova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD., Leading Researcher, tel. (383)365-96-54, e-mail: alex@math.nsc.ru

Maria P. Varygina

Institute of Computational Modeling, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, b. 44, PhD, Researcher, tel. (3912)43-27-56, e-mail: varyginam@yandex.ru

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, tel. (383)365-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

The authors present the results of numerical study into the propagation of seismic waves in a two-dimensional model of a block medium. The medium is modeled by a square lattice of masses connected by springs. Under analysis is the impulsive and step loading. Oscillograms of displace-

ments and displacement velocities of the surface masses are calculated. The obtained results are compared with the numerical solutions of the similar problems on an elastic medium.

Key words: block medium, seismic wave, Lamb's problem, impulse loading.

Исследования последних лет, касающиеся распространения сейсмических волн в породных массивах, свидетельствуют о необходимости учета в математических моделях, предназначенных для геомеханики и сейсмоки, блочного строения горных пород. На развитие этих разработок большое влияние оказала фундаментальная концепция блочно-иерархического строения объектов геосреды М. А. Садовского [1]. Расчеты волнового движения в цепочке упругих стержней, разделенных податливыми прослойками, показали, что низкочастотное возмущение, возникающее при импульсном воздействии, достаточно хорошо описывается в модели “жесткие блоки – вязкоупругие прослойки”. Такой подход был использован в работах [2, 3] для описания динамического поведения двумерной блочной среды, в которой жесткие блоки предполагались прямоугольной формы. Более упрощенную модель блочной среды можно получить, если считать блоки сосредоточенными массами, соединенными пружинами.

Двумерная упругая модель распространения волн в блочных средах

В настоящей работе исследуется задача Лэмба о действии сосредоточенной нагрузки на поверхность блочного полупространства. Блочная среда моделируется однородной двумерной решеткой, состоящей из масс, соединенных пружинами в направлениях осей x , y и в диагональных направлениях (рис. 1). Задача рассматривается в плоской постановке. Принятая модель совпадает с используемой в [4].

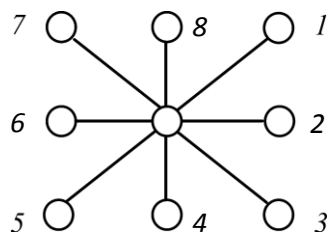


Рис. 1. Схема соединения масс пружинами в квадратной решетке

Уравнения движения массы с номерами n , m , находящейся вдали от поверхности, имеют вид:

$$\begin{aligned} M\ddot{u}_{n,m} &= k_1(u_{n+1,m} - 2u_{n,m} + u_{n-1,m}) + k_2(u_{n+1,m+1} + u_{n-1,m-1} + u_{n+1,m-1} + \\ &+ u_{n-1,m+1} - 4u_{n,m})/2 + k_2(v_{n+1,m+1} + v_{n-1,m-1} - v_{n-1,m+1} - v_{n+1,m-1})/2, \\ M\ddot{v}_{n,m} &= k_1(v_{n,m+1} - 2v_{n,m} + v_{n,m-1}) + k_2(u_{n+1,m+1} + u_{n-1,m-1} - u_{n+1,m-1} - \\ &- u_{n-1,m+1})/2 + k_2(v_{n+1,m+1} + v_{n-1,m-1} + v_{n-1,m+1} + v_{n+1,m-1} - 4v_{n,m})/2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u, v — перемещения в направлениях x, y ; n, m — номера масс в направлениях x, y ; M — масса; k_1, k_2 — жесткости пружин в осевых и диагональных направлениях.

Уравнения движения блоков на границе ($m = 0$) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} M\ddot{u}_{n,0} &= k_1(u_{n+1,0} - 2u_{n,0} + u_{n-1,0}) + k_2(u_{n-1,-1} + u_{n+1,-1} - 2u_{n,0} + v_{n-1,-1} - v_{n+1,-1})/2, \\ M\ddot{v}_{n,0} &= k_1(v_{n,-1} - v_{n,0}) + k_2(u_{n-1,-1} - u_{n+1,-1} + v_{n-1,-1} - 2v_{n,0} + v_{n+1,-1})/2 + Q_y. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь u — перемещения вдоль границы, v — перпендикулярно границе, Q_y — внешняя действующая сила.

При переходе к сплошной среде уравнениям (1) соответствуют уравнения ортотропной теории упругости, которые при $k_1 = 2k_2$ описывают динамику изотропной упругой среды в условиях плоского напряженного состояния с коэффициентом Пуассона $\sigma = 1/3$, что соответствует $\lambda = 2\mu$.

В дальнейшем полагаем, что решетка изотропная — $k_1 = 2k_2$ и на поверхности полупространства действует вертикальная сосредоточенная сила в точке $n = 0$: $Q_y = P_0 \delta_{0n} Q(t)$, где δ_{0n} — символ Крнекера.

Как показано в [5, 6], модуль фазовой и групповой скорости длинноволновых возмущений в изотропной блочной среде определяется по формуле

$$|c_f^\pm| = |c_g^\pm| = l \sqrt{\frac{2k_1 \pm k_1}{2M}} = c^\pm. \quad (3)$$

Здесь знак «+» соответствует продольным волнам, знак «-» — сдвиговым волнам.

Массу шариков и длину пружин примем за единицы: $M = 1, l = 1$. В дальнейшем будем полагать $k_1 = 3/4$. Значение k_1 выбиралось так, чтобы скорость бесконечно длинных волн в решетке была равна скорости продольных волн в изотропной упругой среде в случае плоского напряженного состояния: $(k_1 + k_2)l^2 / M = E / \rho(1 - \nu^2)$. При $E / \rho = 1$ отсюда следует $k_1 = 3/4$.

Вычислим скорости продольных и сдвиговых волн в блочной среде по формулам (3)

$$c_p = c^+ = l \sqrt{\frac{3k_1}{2M}} = \frac{3}{2\sqrt{2}}, \quad c_s = c^- = l \sqrt{\frac{k_1}{2M}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}.$$

Скорость волн Рэлея в блочной среде [7] совпадает со скоростью волн Рэлея в изотропной упругой среде ($\sigma = 1/3$):

$$c_R = \sqrt{\frac{E(1-\sqrt{3})}{4\rho}} = l \sqrt{\frac{k_1}{M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)} = \frac{\sqrt{3-\sqrt{3}}}{2} \approx 0.563....$$

Уравнения (1), (2) решались методом конечных разностей по явной схеме. Условие устойчивости уравнений во внутренней области: $\tau \leq l\sqrt{2M/3k_1} = 2\sqrt{2}/3$, в граничных точках $\tau \leq l\sqrt{8M/9k_1} = \sqrt{32/27}$.

Кроме расчетов движения масс на поверхности блочной среды по системе (1), (2) проводились расчеты движения соответствующих точек на поверхности упругого полупространства под действием сосредоточенного воздействия. Расчеты динамики упругого полупространства производились на основе двуциклического метода расщепления по пространственным переменным в сочетании с явной монотонной ENO-схемой с предельной реконструкцией решения. Схемы для решения одномерных задач основаны на методе распада разрыва Годунова на равномерной сетке с выбором предельно допустимого по условию Куранта–Фридрихса–Леви шага по времени $\tau = \min(\Delta x_1/c_p, \Delta x_2/c_p)$, Δx_i – шаг сетки в направлении x_i ($i=1,2$) [8, 9].

Как пример расчетов уравнений (1), (2) на рис. 2 тонкими линиями представлены в безразмерных координатах осциллограммы скоростей и перемещений вдоль поверхности $\dot{u}, u$ и поперек $\dot{v}, v$ массы с координатами ($m=0, n=60$) на поверхности полуплоскости для задачи Лэмба для бочной среды при действии вертикальной силы, приложенной к массе с координатами (0,0): $Q(t) = Q_0 H(t)$, где $H(t)$ — функция Хевисайда.

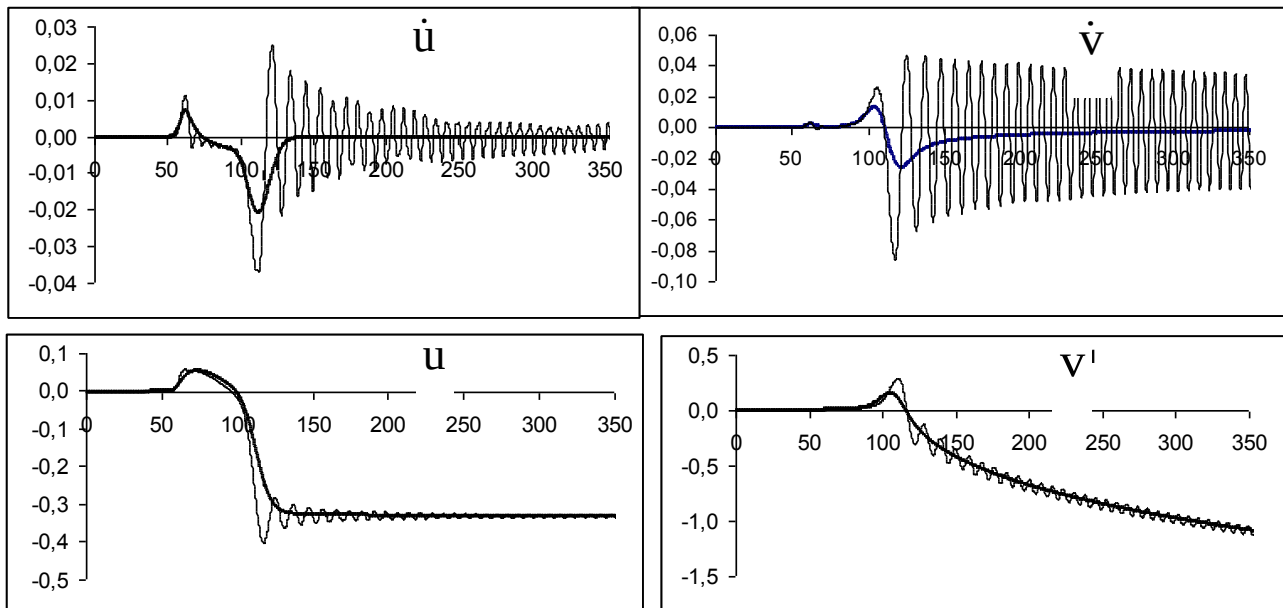


Рис. 2

Толстыми линиями на рис. 2 представлены графики скоростей и перемещений, полученные в рамках упругой модели. По приведенным графикам видно, что скорости перемещений в продольной и поперечной волнах достаточно близки по обеим моделям. В тоже время в районе волны Рэлея приведенные осциллограммы значительно отличаются. Для блочной модели характерны высо-

кочастотные колебания скоростей значительной амплитуды. Осциллограммы перемещений отличаются мало. По обеим моделям горизонтальные перемещения $u(t)$ после прихода волны Рэлея выходят на постоянный уровень, соответствующий решению статической задачи Фламана о нагружении упругой полуплоскости постоянной силой.

Были проведены расчеты для различных значений $n \in (10-240)$. Анализ возмущений на поверхности полуплоскости в релеевской волне показал, что в блочной среде максимальная амплитуда скоростей перемещений $\dot{u}$ убывает как $n^{-0.32}$, $\dot{v}$ как $n^{-0.41}$. Аналогичные исследования, проведенные для $\dot{v}$ на оси воздействия $n = 0$, показали, что максимальные возмущения достигаются в продольной волне и с глубиной убывают как $|m|^{-0.68}$.

Для оценки спектрального состава колебаний масс в решетке были вычислены спектральные плотности скоростей перемещений. Их анализ показал, что на поверхности блочной среды спектр колебаний масс ограничен частотой $\omega_1 = 1$, резонансной для поверхностных волн [7].

Кроме приведенных расчетов для нагружения в виде функции Хевисайда были проведены расчеты для импульсного нагружения вертикальной силой, описываемого полуволной синуса разной длительности t_0 . Результаты таких расчетов при $t_0 = 5\pi/2$ приведены на рис. 3 в виде осциллограмм скоростей движения массы с координатами (60, 0) на поверхности.

Толстыми линиями на рис. 3 приведены расчетные осциллограммы скоростей движения и перемещений точек поверхности упругой полуплоскости, полученные в аналогичной постановке для уравнений теории упругости.

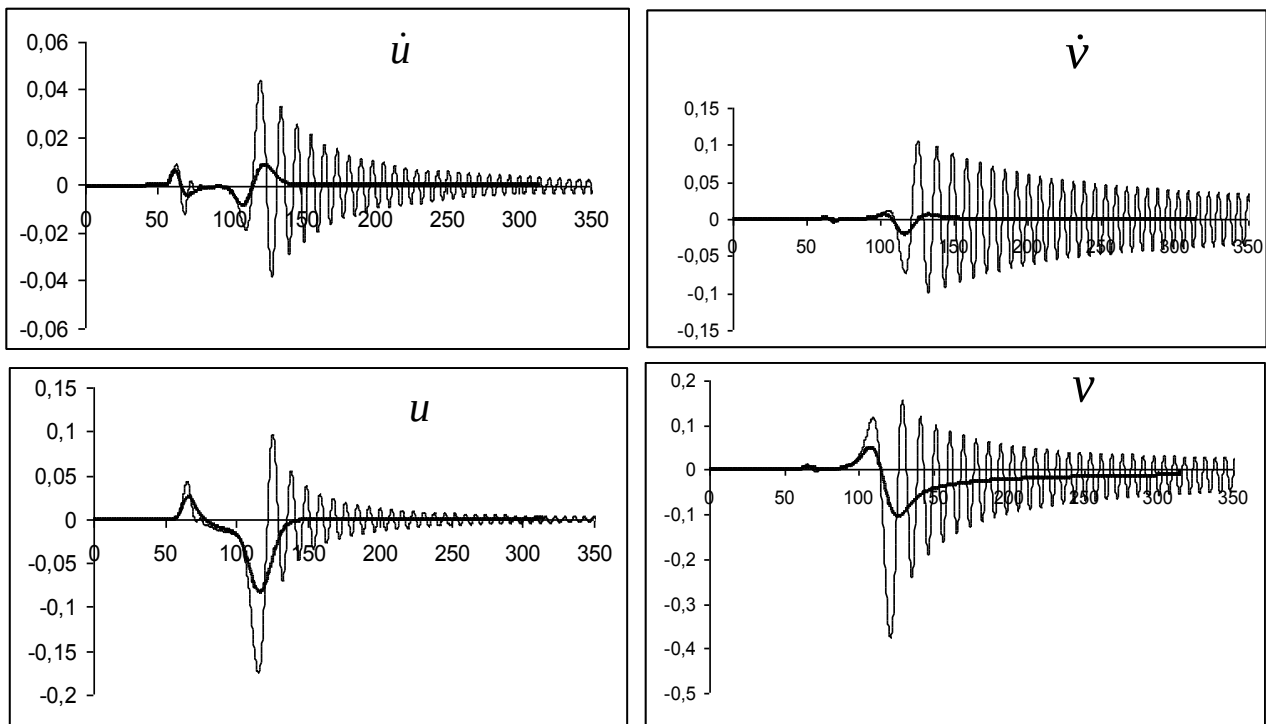


Рис. 3

Анализ результатов расчетов, проведенных при разных t_0 , показал, что максимальное отличие характера поведения колебаний блочной среды и упругого полупространства наблюдается при коротком по времени воздействии. В блочной среде с приходом волны Релея возникают слабо затухающие высокочастотные колебания. С увеличением времени нагружения такие колебания быстрее затухают. При больших временах нагружения головная часть релеевской волны становится похожа на волну Релея в упругом полупространстве.

Заключение

Проведенное исследование динамического поведения двумерной модели блочной среды при воздействии вертикальной сосредоточенной нагрузки на полупространство (задача Лэмба) показало, что наличие структуры в среде приводит к изменению её поведения по сравнению, с тем, что предсказывает непрерывная модель, получаемая усреднением механических свойств блочной среды. Отличие от непрерывной среды особенно сильно проявляется в районе фронта волны Релея, а именно – появляются высокочастотные осцилляции скоростей колебаний значительной амплитуды, отсутствующие в непрерывной среде. Полученный результат свидетельствует о необходимости учета блочного строения горных пород при расчете интенсивности сейсмических волн при массовых взрывах.

Работа выполнена по проекту ОНЗ РАН 3.1 и при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829–832.
2. Сарайкин В. А. Расчет волн, распространяющихся в двумерной сборке из прямоугольных блоков // ФТПРПИ. – 2008. – № 4. – С. 32–42.
3. Сарайкин В. А. Распространение низкочастотной составляющей волны в модели блочной среды // ПМТФ. – 2009. – Т. 50. – № 6. – С. 177–185.
4. Jensen J.S. Phononic band gaps and vibrations in one- and two-dimensional mass – spring structures // Journal of Sound and Vibration. – 2003. – V. 266. P. 1053–1079.
5. Александрова Н.И., Шер Е.Н. Распространение волн в двумерной периодической модели блочной среды. Ч.1: Особенности волнового поля при действии импульсного источника // ФТПРПИ. – 2010. – № 6. – С. 60–72.
6. Александрова Н.И. Распространение волн в двумерной модели блочной среды при воздействии типа «центр вращения» // Геодинамика и напряженное состояние недр земли. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. – Т. 1. – С. 257–263.
7. Aleksandrova N. I. The discrete Lamb problem: Elastic lattice waves in a block medium // Wave Motion – 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wavemoti.2014.02.002>.
8. Варыгина М.П., Похабова М.А., Садовская О.В., Садовский В.М. Вычислительные алгоритмы для анализа упругих волн в блочных средах с тонкими прослойками // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2011. – Т. 12. С. 435–442.
9. Садовский В.М., Садовская О.В., Варыгина М.П. Анализ резонансного возбуждения блочной среды на основе уравнений моментного континуума Коссера // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2013, – Т. 5, – №1. С. 111–118.

© Н. И. Александрова, М. П. Варыгина, Е. Н. Шер, 2014

СОЗДАНИЕ ТЕХНИКИ ДЛЯ БУРЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СКВАЖИН

Анатолий Антонович Репин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, тел. (383)217-08-61, e-mail: repin@misd.nsc.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)217-09-63, e-mail: Alex@misd.nsc.ru

Владимир Николаевич Карпов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)217-09-63, e-mail: kvn184@mail.ru

Буровая техника представлена как инструмент исследований. Показана необходимость проходки прямолинейно направленных скважин. Описаны преимущества пневмоударного способа бурения. Представлены принципиальная схема и экспериментальный образец погружного пневмоударника малого диаметра и его техническая характеристика.

Ключевые слова: скважина, удар, энергоемкость, шлам, буровая коронка, расширение скважин, давление воздуха, буровой став.

LONG INVESTIGATION HOLE DRILLING EQUIPMENT

Anatoly A. Repin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Assistant Professor, Deputy Director for Science, tel. (383)217-08-61, e-mail: repin@misd.nsc.ru

Sergey E. Alekseev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Senior Researcher, tel. (383)217-09-63, e-mail: Alex@misd.nsc.ru

Vladimir N. Karpov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)217-09-63, e-mail: kvn184@mail.ru

The article considers drilling equipment as a research tool. The authors discuss the issues and relevancy of straightness of borehole drilling and the advanced features of percussion drilling. The basic diagram and preproduction prototype of a small-diameter downhole hammer and its specification are presented in the article.

Key words: borehole, blow, energy consumption, drilling mud, drilling bit, reamer, air pressure, drilling assembly.

При производстве горных работ в различных условиях одной из важнейших составляющих является бурение скважин.

Важным направлением является проходка скважин для научных целей. При изучении напряженного состояния массивов горных пород необходимо проведение инструментальных измерений естественных напряжений в них. Это нужно для работы существующих и при строительстве новых горнодобывающих предприятий [1]. При эксплуатации искусственных сооружений, таких как плотины гидроэлектростанций, для оценки их состояния, выявления зон неупругих деформаций, также необходимо определение внутренних напряжений. Прогнозирование опасных явлений, таких как горные удары, возникновение очагов самовозгорания в угольных шахтах, связанных с горным давлением, также нуждается в изучении напряженного состояния горного массива. Для установки регистрирующей аппаратуры внутри массива необходима проходка скважин различной протяженности и направления. Техника и технология бурения является необходимым инструментом проведения научных исследований.

На открытых работах при изучении структуры грунта, для определения неоднородностей, для обнаружения залегания полезных ископаемых, методом вибрационного или ударного воздействия на породу, также нужна установка датчиков внутри скважин.

Весьма сложной задачей является проходка скважин в породах средней и высокой крепости. Ударный способ обладает наименьшей энергоемкостью разрушения таких пород, позволяет снизить энергозатраты при производстве работ и обеспечить достаточно высокую производительность.

В середине прошлого века в России были разработаны первые конструкции и изготовлены первые образцы пневматических машин ударного действия, располагаемые непосредственно у забоя буримой скважины – погружные пневмоударники. Такое расположение обеспечивает наилучшую передачу энергии удара на забой, позволяет увеличить скорость бурения и глубину скважины. Сжатый воздух используется как энергоноситель и как очистной агент, что делает технологию бурения более рациональной. Эти обстоятельства, а также простота и относительная дешевизна этой техники делает привлекательным применение этих машин, как в подземных условиях, так и на открытых горных работах.

Погружные пневмоударники имеют выраженные особенности. Для размещения в ограниченном пространстве скважины они должны быть максимально компактными, а для эффективного разрушения горной породы должны обладать значительной мощностью. Повышены требования к их надежности.

Важным преимуществом является то, что при ударном взаимодействии, возникающие силы замыкаются в системе «ударник – инструмент – забой скважины», что дает возможность ограничиться небольшой величиной осевого нажатия на забой скважины, а так же и крутящего момента. Это позволяет использовать в сравнении с другими способами бурения значительно более легкий буровой станок.

Одной из проблем при бурении является уводка скважины от заданного направления. Для повышения точности производимых исследований, для установки датчиков в строго заданном месте большое значение имеет прямолинейность буримых скважин.

На искривление скважин имеет влияние много факторов. К ним можно отнести неоднородность буримой породы, жесткость бурового става, усилие, приложенное к буровому снаряду, конструкция бурового инструмента и другие факторы.

При пневмоударном бурении разрушение породы происходит за счет удара ударника по буровой коронке и не требует большого осевого прижатия. Данный способ бурения способен обеспечить более прямолинейно направленное бурение.

Для сведения к минимуму факторов, влияющих на искривление скважины и при пневмоударном бурении необходимо использовать погружные пневмоударники наименьшего диаметра. Это позволяет уменьшить силовую нагрузку на буровой став и станок. Получение скважины нужного диаметра осуществляется путем расширения данной точно направленной передовой скважины до заданного размера.

Оборудование для проходки скважин исследовательского назначения должно обладать большой мобильностью для возможности ее доставки в самые различные места в подземных условиях и на открытых работах. Пневмоударники малого диаметра, а также легкий буровой станок не требует большого расхода воздуха и позволяет использовать легкие передвижные компрессоры. Возможно использование компрессоров небольшой производительности, но повышенного давления.

Небольшая площадь затрубного пространства позволяет осуществлять вынос шлама из скважины значительной протяженности небольшим количеством воздуха. Глубина скважины при работе на обычном давлении 0,5 – 0,7 МПа может составлять до 100 м, а при работе на высоком давлении (1,8 – 2,5 МПа) до 300 м.

Это, а также возможность проходки более прямолинейно направленных скважин говорит в пользу создания малогабаритной буровой техники.

Создание пневмоударника для бурения скважин малого диаметра является достаточно сложной технической задачей ввиду того, что диаметр скважины жестко лимитирует поперечные габариты погружного пневмоударника и ограничивает возможности образования рабочих площадей ударника необходимой величины.

При разработке пневмоударника для точно направленного бурения предпочтение следует отдать принципиальной схеме с центральным соударением ударника и буровой коронки. Это определяет более симметричное распределение сил при взаимодействии коронки с забоем, уменьшает изгибающие моменты и снижает риск искривления скважины. Для обеспечения надежности важно, чтобы тело ударника, как наиболее нагруженной детали не было ослаблено какими либо внутренними каналами. Это особенно важно при использовании

энергоносителя высокого давления, когда напряжения в ударных деталях значительно увеличиваются.

В Институте горного дела СО РАН проводится поиск таких решений.

Предложена схема погружного пневмоударника (рис. 1), обладающая необходимыми качествами [2].

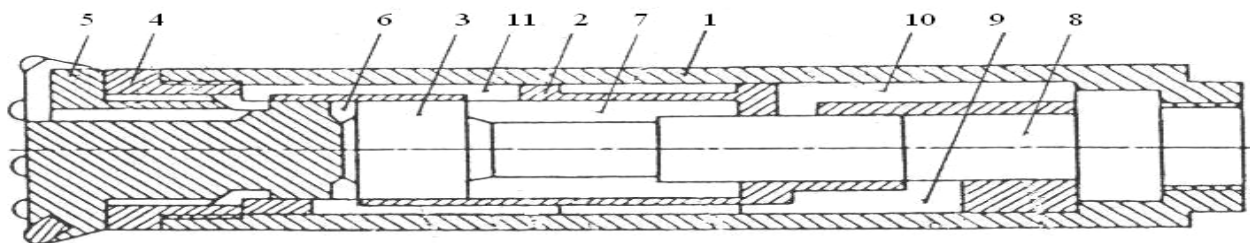


Рис. 1. Схема погружного пневмоударника с центральным соударением ударника и коронки

1 – корпус; 2 – гильза; 3 – ударник; 4 – букса; 5 – буровая коронка; 6 – камера холостого хода; 7 – управляемая камера рабочего хода; 8 – камера рабочего хода постоянного давления; 9 – питающий канал для камеры холостого хода; 10 – питающий канал для камеры рабочего хода; 11 – выхлопной канал

Закрытый тип пневмоударника обеспечивает хорошую износостойкость трущихся посадочных поверхностей, а также хорошую очистку забоя скважины от бурового шлама, предотвращая его переизмельчение. Центральное соударение ударника с буровой коронкой улучшает передачу энергии удара за счет уменьшения поперечных колебаний, а также снижает напряжения в соударяющихся деталях вследствие более равномерного распределения ударной нагрузки по их сечениям. Беззолотниковое воздухораспределение и простота конструкции обеспечивает надежную работу машины. Это позволяет увеличивать энергетические параметры пневмоударника без особого риска поломки соударяющихся деталей. Используется шлицевое соединение пневмоударника с коронкой, что также позволяет уменьшить потери энергии при передаче ее от ударника к коронке.

К особенностям данной схемы можно отнести еще то, что ударник не имеет внутренних каналов ввиду того, что он расположен в полости охватывающей его гильзы и все необходимые воздухораспределительные каналы выполнены в ее стенках. Наличие гильзы несколько уменьшает степень использования поперечного сечения полости корпуса для образования рабочих площадей ударника. При необходимости повышения энергетических параметров это может осуществляться за счет увеличения рабочего давления.

По данной принципиальной схеме был спроектирован и изготовлен малогабаритный пневмоударник АШ45 (рис. 2), испытания которого показали хорошую работоспособность такой машины [3].

Пневмоударник предназначен для бурения вертикальных и горизонтальных скважин по углю и породам крепостью до $f = 16$.

Модификация пневмоударника может быть использована при формировании бурового снаряда в качестве ударной штанги также при ударно-поворотном бурении с использованием колонкового перфоратора, что позволило бы увеличить скорость бурения и глубину скважины.



Техническая характеристика

Диаметр буримой скважины, мм	–	45
Глубина скважин, м	–	100 и более
Диаметр корпуса пневмоударника, мм	–	39
Длина пневмоударника, мм	–	737
Рабочее давление, МПа	–	0.5 – 0.7
Энергия удара, Дж (при 0.5 МПа)	–	12
Частота ударов, с ⁻¹ (при 0.5 МПа)	–	20
Ударная мощность, Вт (при 0.5 МПа)	–	240
Расход воздуха, м ³ /мин. (при 0.5 МПа)	–	0.4

Рис. 2. Экспериментальный образец пневмоударника АШ45

На полигоне ИГД СО РАН экспериментальным образцом пневмоударника было произведено пробное бурение по гранитному блоку крепостью $f = 12 - 14$. Для мокрого пылеподавления работа осуществлялась на воздушно-водяной смеси. Давление сжатого воздуха поддерживалось 0.5 МПа. Пневмоударник имел надежный запуск, блокировку и устойчивый режим работы. Скорость бурения по граниту составила 90 мм/мин. Первый опыт создания малогабаритного погружного пневмоударника для проходки глубоких шпуров показал перспективность данного направления. Открывается возможность и в этой области использовать преимущества пневмоударного способа бурения. Нарращивание энергетических параметров малогабаритных пневмоударников может осуществляться при использовании энергоносителя высокого давления – 1.8 – 2.0 МПа, что позволит значительно увеличить скорость проходки скважин в крепких породах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усков Д.В., Усков В.А., Виноградов В.И. Особенности проявления тектонических напряжений в подземных рудниках норильского промышленного района. В сб. Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Труды конференции. Новосибирск. 2007.
2. Пат. РФ № 2311521. Погружной пневмоударник /А.А. Репин и др. Оpubл. 27.11.2007. Бюл. № 33
3. Алексеев С.Е., Репин А.А., Пятнин Г.А. Перспективы создания техники для комбинированного вращательно-ударного способа бурения шпуров. В сб. Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Труды конференции. Новосибирск. 2007.

© А. А. Репин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карпов, 2014

ДЕСТРУКЦИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ САМОРАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Татьяна Анатольевна Киряева

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, докторант ИГД СО РАН, тел. 83832170703, e-mail: coalmetan@mail.ru

Приведены результаты исследований текстурных характеристик различных партий природных углей, установлены корреляционные связи между параметрами текстуры углей Кузбасса, а также между свойствами пористой структуры угольного пласта и внутренней энергией углеметанового вещества.

Ключевые слова: система уголь-метан, углеметановые геоматериалы, выход летучих веществ, удельная поверхность, деструкция, структура горных пород.

COAL BED SELF-DESTRUCTION AND THE DESTRUCTION RATE

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Doctoral Candidate, tel. (838)32170703, e-mail: coalmetan@mail.ru

The data on studies into the texture of various Kuzbass coal batches are presented. The coal texture parameters are correlated with the coal pore structure and internal energy of coal-methane material.

Key words: coal-methane system, coal-methane geomaterials, volatile yield, specific surface area, destruction, rock structure.

Современные представления о свойствах ископаемых углей базируются на основе многообразия процессов формирования углей, их генезиса (степени метаморфизма) в конкретных природных условиях, что приводит к формированию углеродных систем с разнообразной пористой структурой, определенными механическими и физико-химическими свойствами [1].

Знание структуры горных пород дает возможность понять формы существования метана в угольном пласте, позволяющие уточнить физико-химические основы управления газодинамическими процессами при ведении горных работ.

В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде указанного раствора. Процесс распада твердого углеметанового раствора протекает с выделением энергии, реализуемой в том числе и на деструкцию твердой компоненты пласта с образованием дополнительной внутренней поверхности. Чем выше газоносность угольного пласта, тем интенсивнее газо-

динамическая деструкция, вплоть до его саморазрушения в форме внезапного выброса угля и газа. При равной газоносности наиболее склонны к саморазрушению угли средней стадии метаморфизма. Чем выше энергия распада, тем больше степень измельчения отторгаемого угля. Возникают условия для развития микротрещин за счет энергии газа. Таким образом, разрушение твердого вещества угля связано с образованием новой внутренней удельной поверхности. Это раскрывает один из возможных подходов к оценке свойств многокомпонентных геоматериалов на основе измерения удельной поверхности проб углей, отобранных, применительно к решаемой задаче, при различных значениях потенциальной энергии газовой компоненты твердого углегазового раствора (ТУГР).

В проведенных нами экспериментах впервые в качестве одного из элементов метода реализации указанного подхода использовались приборы DigiSorb 2600 (“Micromeritics”, США), AutoPycnometer-1320 (“Micromeritics”, США), NETZSCH STA 449C Jupiter (“NETZSCH”, Германия), СОРБИ-М (“МЕТА”, Россия) для измерения внутренней удельной поверхности и объема микропор, полного объема пор, получения полной изотермы адсорбции/десорбции при изучении физико-химических свойств угля и газокинетических характеристик углеметановых геоматериалов. Исследование параметров пористой структуры природных углей Кузбасса осуществлялось с использованием адсорбционных методов. При необходимости в дальнейших экспериментах будут привлечены другие экспериментальные методы, например, ртутная порометрия и электронная микроскопия.

Важной характеристикой свойств углеродных материалов, определяемой их химическим составом, является истинная плотность. Контроль этой величины проводился с использованием прибора AutoPycnometer-1320 по наиболее инертному флюиду – гелию.

Исследование возможно существующих микропор, т.е. пор молекулярного размера, в прокаленных, для удаления летучих компонентов, природных углях проводилось с использованием сорбции газообразного молекулярного водорода при 77 К т.е. при $T > T_{кр}$. В этих температурных условиях не происходит спонтанное объемное заполнение микропор жидкоподобным сорбатом, а характер изменения плотности сорбата по мере роста давления в основном определяется размерами микропор. Эта особенность адсорбционного процесса позволяет проанализировать текстурные характеристики микропористой структуры, в том числе рассчитать распределение объемов микропор по размерам пор.

Величину удельной поверхности углей S (m^2/g) измеряли на фракции 0,5 - 1 мм (S_1) и на измельченной фракции $\sim 0,05$ мм (S_2) методом термодесорбции аргона при температуре 77 К по четырем точкам сорбционного равновесия на приборе СОРБИ-М (“МЕТА”, Россия). Образцы предварительно тренировали в инертной среде при 150⁰С. Расчет величин поверхности проводили по классической процедуре БЭТ [2].

Исследование пористой структуры образцов проводили методом низкотемпературной (77 К) сорбции азота на установке DigiSorb 2600 (“Micromeritics”,

США). Перед проведением сорбционных экспериментов образцы выдерживали в вакууме 10–4 мм рт. ст. при 150⁰С в течение 5 ч.

Истинную плотность (ρ , г/см³) углей измеряли волюмометрическим методом по гелию на приборе AutoPycnometer-1320 (“Micromeritics”, США).

Удельную поверхность образцов (S , м²/г) измеряли по адсорбции аргона при 77 К (рис. 1, 2), а расчет проводили по методу БЭТ. Из рис. 1 видно, что при некотором измельчении исходной фракции угля (образец 3 и 12) происходит значительное возрастание сорбции аргона, что является следствием роста величины доступной поверхности.

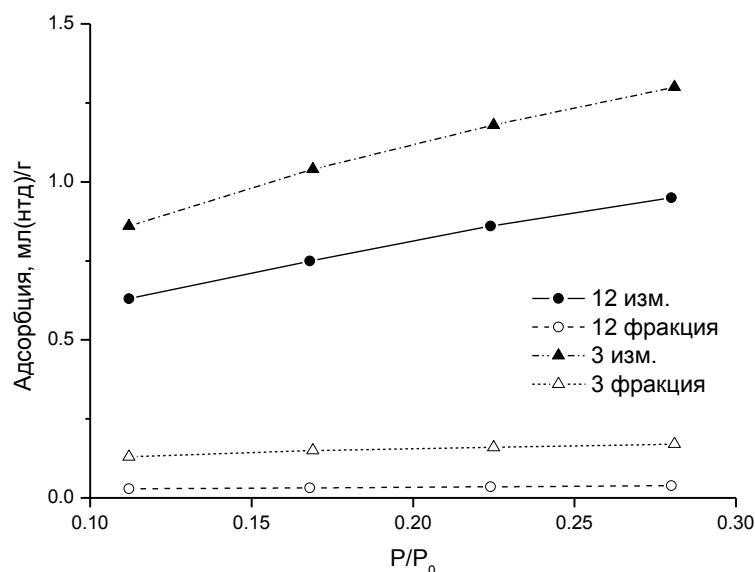


Рис. 1. Изотермы адсорбции Ar при 77 К на некоторых образцах углей Кузбасса

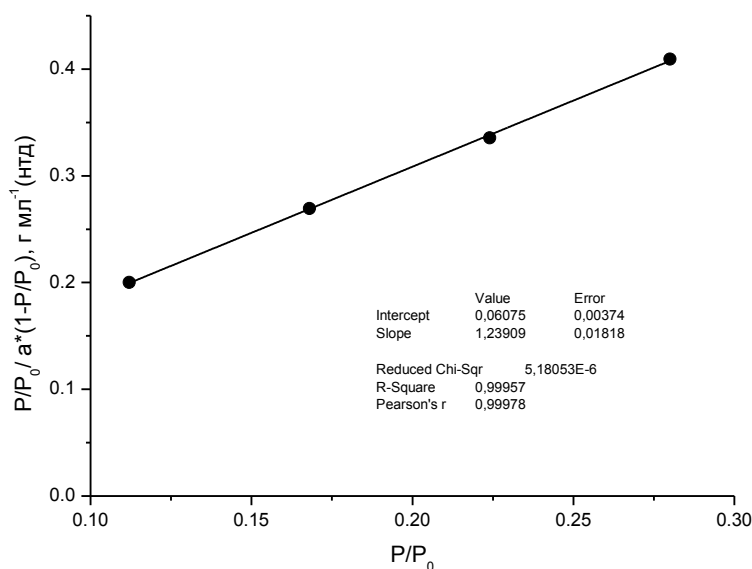


Рис. 2. Пример обработки изотермы адсорбции Ar на образце 12 (изм.) по процедуре БЭТ

В таблице приведены величины удельной поверхности природных углей. Из таблицы следует, что образцы с фракцией 0,5 - 1 мм (S_1) достаточно грубо-дисперсные; оценка показывает, что средний размер частиц, обеспечивающий данное значение поверхности, составляет около 10 мкм. Величина поверхности измельченных углей (S_2) значительно больше.

Таблица

Величины удельной поверхности (S , $\text{м}^2/\text{г}$) образцов углей

S , $\text{м}^2/\text{г}$	Образец									
	1	1 Н	2	3	3 Н	6 Н	7 Н	11	12	15
S_1	0,5	0,34	0,8	0,6	0,8	0,3	-	0,4	0,15	0,17
S_2	5,4	4,2	4	4,9	5	3,5	3,5	3,7	5,7	3,3

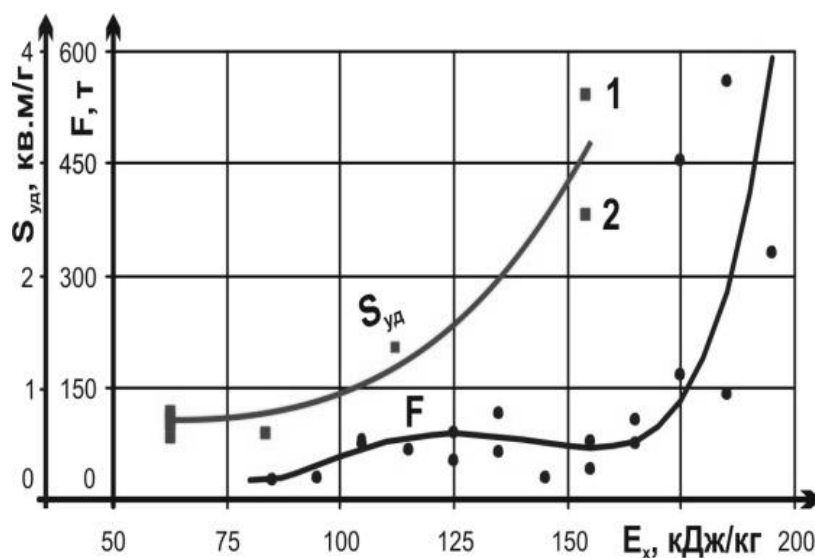
S , $\text{м}^2/\text{г}$	Образец									
	16	30	31	32	34	35	36	37	38	39
S_1	0,14	0,15	0,29	-	-	-	-	-	-	-
S_2	4,2	-	-	3,2	2,9	0,7	3,5	2,8	4,2	2,4

Рост удельной поверхности при измельчении, как показывают оценки, не может быть связан с ростом дисперсности первичных частиц угля при измельчении образцов в ступке, и, соответственно, обусловлен наличием в образцах углей «закрытой» пористости, которая становится доступной при измельчении.

В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде этого раствора. Процесс распада твердого углеметанового раствора протекает с выделением энергии, реализуемой в том числе и на деструкцию твердой компоненты угольного пласта с образованием дополнительной внутренней поверхности. Чем выше газоносность угольного пласта, тем интенсивнее газодинамическая деструкция, вплоть до его саморазрушения в форме внезапного выброса угля и газа. При равной газоносности наиболее склонны к саморазрушению угли средней стадии метаморфизма. Чем выше энергия распада, тем больше степень измельчения отторгаемого угля. Возникают условия для развития микротрещин за счет энергии газа. Таким образом, разрушение твердого вещества угля связано с образованием новой внутренней удельной поверхности.

Исследованы пробы углей с различным выходом летучих веществ от 18% до 43% 5 шахтопластов Кузбасса и эмпирически установлены зависимости роста внутренней удельной поверхности частиц отбитого угля $S_{уд}$ для разных f – коэффициентов крепости угля по М.М. Протоdjяконову и силы F внезапных выбросов угля и газа (рис. 3) от внутренней энергии углеметана E_x .

Близкая связь с внутренней энергией углеметана имеет место и в изменении силы внезапных выбросов угля и газа (ВВУГ). Для этого вывода были собраны и обработаны статистические данные шахт Карагандинского, Кузнецкого и Печерского бассейнов о зарегистрированных в период с 1943 г. по настоящее время 197 случаях внезапных выбросов.



Условные обозначения: 1 – прочная пачка ($f > 1$); 2 – выбросоопасная пачка ($f \approx 0,4$)

Рис. 3. Зависимость величины удельной поверхности угля $S_{уд}$ и силы внезапных выбросов F от внутренней энергии углеметана E_x

Оперативное решение задач обеспечения газовой безопасности шахт требует применения экспресс-методов. Одним из таких методов и может являться метод определения удельной поверхности проб углей, отобранных в действующих забоях.

Исследования показали, что со временем хранения угля ослабевают связи в углеметановом веществе, в том числе и связь метана с веществом угля.

В частности было изучено изменение плотности образцов при измельчении и, для ряда образцов - в ходе хранения (ρ_1 - плотность образца после хранения, ρ_2 - плотность “свежего” образца) (рис. 4, 5). Значение плотности ρ_2 хорошо соответствует типичным величинам плотности для каменных углей ($1,3-1,4 \text{ г/см}^3$) различной стадии метаморфизма.

Для всех исследованных образцов природных углей был проведен термический анализ (ТГ) для определения оставшейся массы образца при его нагревании (первоначальная масса взята за 100%). Как видно из рис. 5, все образцы теряют в весе при нагреве, но с разной интенсивностью и в разных интервалах температур. У проб углей со временем хранения 12 лет потери массы Δm (в % от первоначальной) при нагревании до 500°C почти в 3 раза больше (рис. 6).

Это подтверждает и зависимость внутренней энергии релаксации метаносности E [3] от изменения массы угля. На рис. 7 приведена корреляционная зависимость внутренней энергии релаксации метаносности и изменения массы угольных образцов при T_2 . Видно, что наличие в образцах трудноудаляемых (“сильно” связанных) форм летучих компонентов (пробы 1, 3, 38, 39) приводит к росту энергии релаксации метаносности, и наоборот – легкоудаляемые формы (пробы 30, 31) обладают меньшими величинами энергии E .

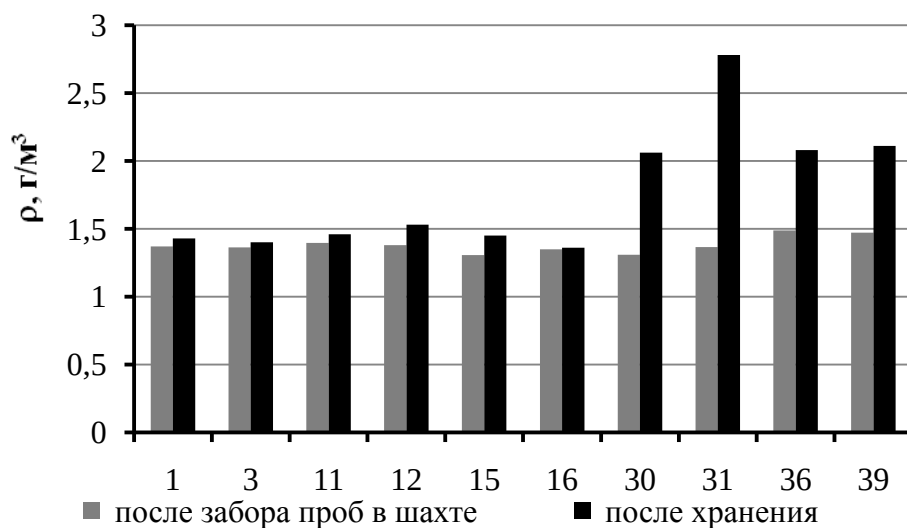


Рис. 4. Изменение истинной плотности образцов углей при хранении

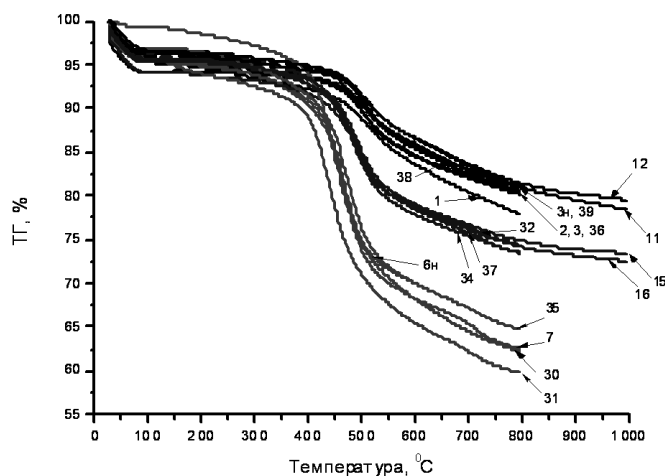


Рис. 5. Общие результаты термического анализа (ТГ) исследованных образцов углей. Номера образцов указан на рисунке

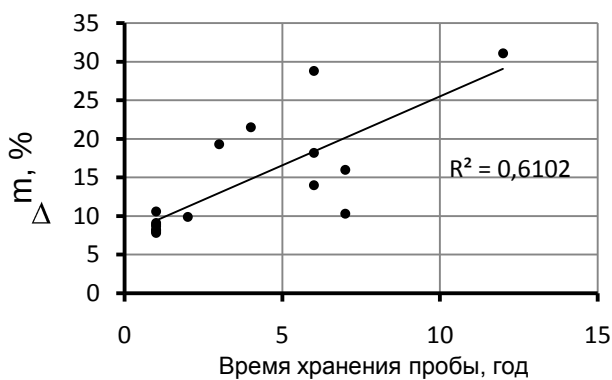


Рис. 6. Зависимость потери массы Δm проб исследованной серии углей при 500 °С от времени их хранения

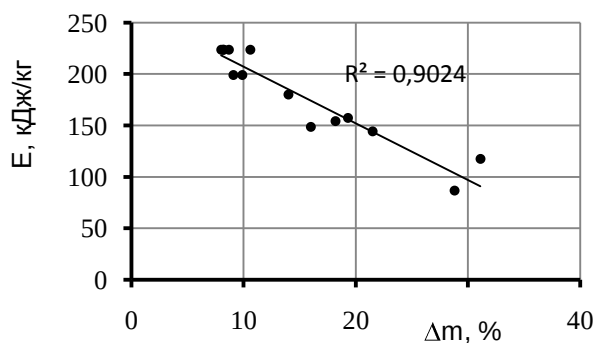


Рис. 7. Взаимосвязь значений внутренней энергии релаксации метаноносности E и изменения массы Δm угольных образцов Кузбасса

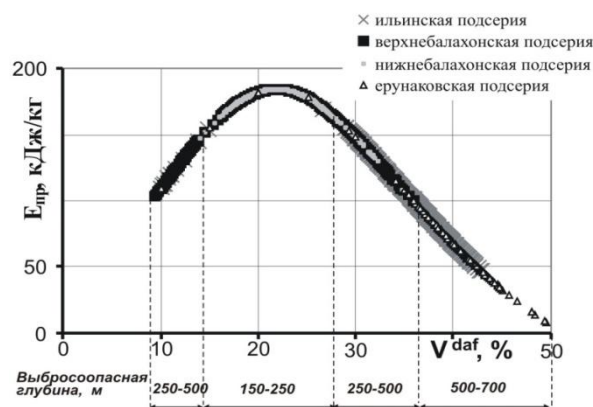


Рис. 8. Изменение предельных значений внутренней энергии релаксации E для углей Кузбасса [3]

В настоящее время можно лишь предположить, что это обусловлено различной способностью метана растворяться в этих формах «жидкоподобных» компонентах каменных углей, что требует дополнительных исследований. С другой стороны, как показано в [1], внутренняя энергия углеметана максимальна для углей средней стадии метаморфизма. Образцы с прочными видами связи имеют выход летучих от 18 до 25 % и относятся к средней стадии метаморфизма угля, которая является наиболее выбросоопасной (рис. 8).

Таким образом, изменение величины внутренней удельной поверхности частиц угля (деструкция) и интенсивность саморазрушения пласта имеют близкий физический механизм, связанный с реализацией энергии газовой компоненты геоматериала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00673), партнерского интеграционного проекта СО РАН №100 и проекта ОНЗ РАН-3.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киряева Т.А. Разработка метода газодинамической активности угольных пластов по геолого-разведочным данным на примере Кузбасса. – Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011.
2. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость // М.: Мир, 1984.
3. Киряева Т.А. Релаксационная способность метаноносности угольного пласта / Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология – Новосибирск: СГГА, 2013. – Т. 3. – С. 47-52.

© Т. А. Киряева, 2014

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДВИЖЕНИЙ ПОРОДНОГО МАССИВА НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ГОРНОЙ ШОРИИ

Аркадий Васильевич Леонтьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-06-36, e-mail: leon@misd.nsc.ru

Татьяна Валентиновна Лобанова

Сибирский государственный индустриальный университет, Научно-исследовательский центр «Геомеханика», 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, доктор технических наук, руководитель центра, тел. (3843)78-43-32, e-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru

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: массив горных пород, смещения, массовые взрывы, разломы.

DEFORMATION MONITORING IN IRON ORE BODEIS AND HOST ROCKS IN GORNAYA SHORIA

Arkady V. Leontiev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-06-36, e-mail: leon@misd.nsc.ru

Tatiana V. Lobanova

Geomekhanika Research Center, Siberian State Industrial University, 654007, Russia, Novokuznetsk 42 Kirova St., Dr Eng, Chief Executive, tel. (3843)78-43-32, e-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru

Under consideration are the principles of geomechanical support of underground mineral mining in a geodynamically active region, with the peculiar attention given to the parameters of displacement and mechanisms of deformation of the protected objects on the mine industrial sites situated in undermined areas.

Key words: rock mass, displacement, large-scale blasting, faults.

Горную Шорию (юг Кемеровской области, Россия) представляют железорудные месторождения Тельбесского и Кондомского районов. К месторождениям Тельбесского района относятся Сухаринское, Темирское и Казское, к Кондомской группе – Таштагольское и Шерегешевское. Наиболее крупными в Горной Шории являются Таштагольский, Шерегешский и Казский рудники.

Отличительная особенность железорудных месторождений состоит в том, что их отработка осуществляется в условиях повышенной опасности проявления динамических событий. Наиболее опасным по количеству сейсмических

событий и их интенсивности является Таштагольское месторождение. Здесь уже на глубине 300 м наблюдались стреляния горных пород, а в настоящее время при работах на глубине 500 м и более имеют место горные удары в том числе большой разрушительной силы ($10^7 - 10^9$ Дж), вызывающие повреждение горных выработок на большой площади, остановку технологических процессов и, в конечном итоге, приводящие к существенным экономическим потерям. В период с 1959 г. по настоящее время на месторождении зафиксировано более 23 тыс. динамических проявлений горного давления, из них 20 собственно горных ударов.

Обстановка в регионе месторождений усугубляется тем, что Кемеровская область и Хакассия соседствуют с Алтае-Саянской горной провинцией, отличающейся повышенной сейсмоактивностью. В восточной ее части постоянно регистрируются землетрясения с магнитудой $M \geq 3.5$. Кроме того, процесс добычи предполагает проведение как технологических, так и массовых взрывов. Их гипоцентры достигают глубин 300 – 700 м, а заряды взрывчатых веществ достигают 700 т. Исследования показывают, что сейсмические воздействия взрывов на массив превосходят влияние природной сейсмичности.

Таким образом, в условиях сейсмоактивности региона, масштабного недропользования и концентрации техногенной деятельности на небольшой территории, формируется геомеханическое пространство, опасное по катастрофическим проявлениям горного давления. Отсюда следует актуальность геомеханического мониторинга за состоянием природной среды с целью прогнозирования и предупреждения негативных явлений, сопровождающих производственный процесс.

В целях геомеханического обеспечения подземной отработки месторождений и обоснования безопасной эксплуатации охраняемых объектов на месторождениях ведется контроль движений земной поверхности и подрабатываемых скальных массивов.

Шерегешевский геодинамический полигон. Инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности на месторождении ведутся с 1964 г. В настоящее время постоянные наблюдательные станции заложены на всех действующих участках шахты – «Главный», «Болотный», «Новый Шерегеш», «Подрусловый» (рис. 1). Эти станции представлены системой из 16 профильных линий, по которым наблюдается около 190 реперов. Оценки сдвижения горных пород в районах охраняемых объектов (сооружения промплощадки рудника, ручей Большая речка, жилые дома) в периоды производства массовых взрывов и происходящих после этого перераспределений напряжений в налегающих и боковых породах проводятся на основе многочасовых GPS-наблюдений по характерным пунктам данных профильных линий.

Таштагольский геодинамический полигон. Инструментальный контроль развития процессов сдвижения горных пород и земной поверхности при отработке Таштагольского месторождения осуществляется в мониторинговом режиме на геодинамическом полигоне, созданном в 60–80-е годы прошлого столетия. Сегодня полигон содержит (рис. 2): 11 профильных линий на Восточном

участке, состоящих из 280 грунтовых реперов, которые заложены на земной поверхности, в породах висячего, лежащего боков (вкрест простирания рудных тел) и на флангах рудной зоны (по простиранию); профильную линию вкрест простирания Юго-Восточного участка из 50 реперов; около 240 контурных реперов, размещенных в кровле и почве горных выработок, и 45 станций глубинных реперов в рудном массиве и вмещающих породах на 6 горизонтах шахты на Восточном, Юго-Восточном и Северо-Западном участках.

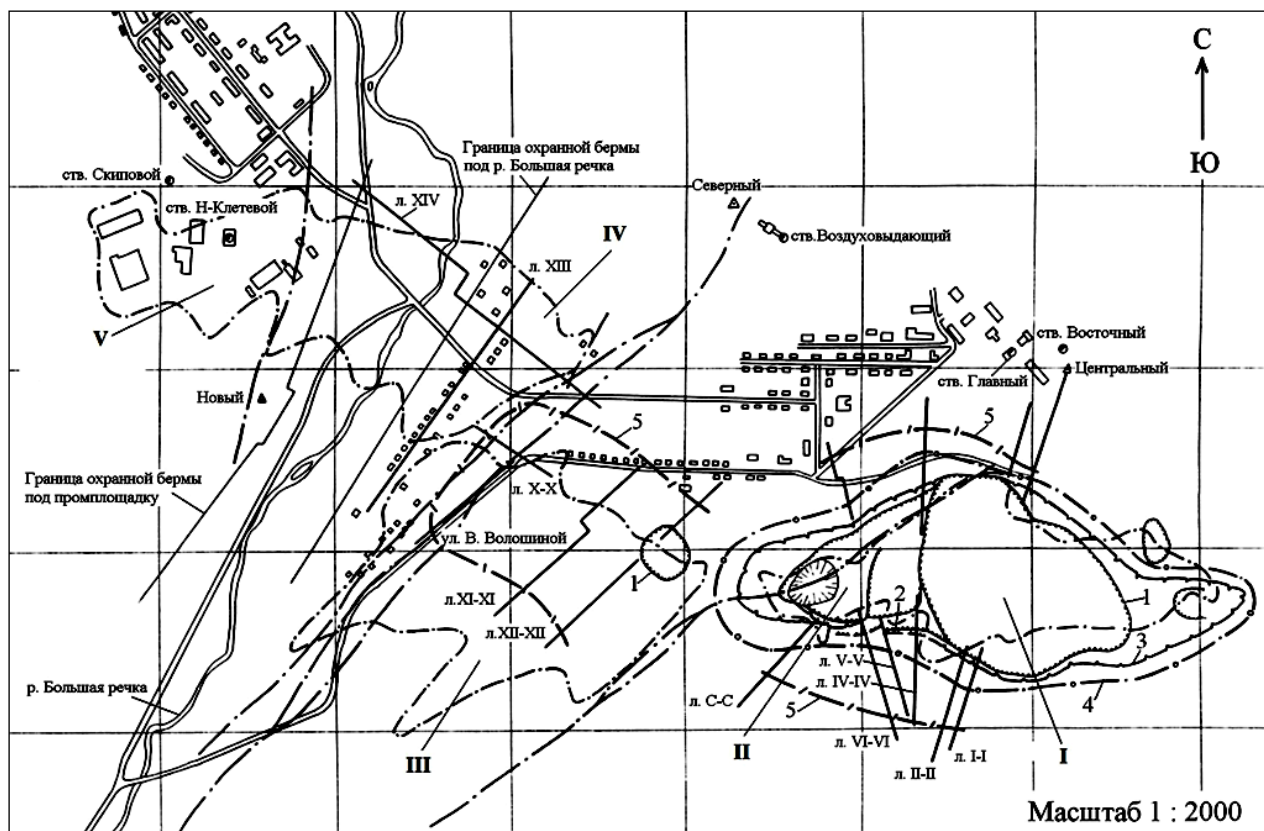


Рис. 1. План наблюдательных станций за сдвижением земной поверхности Шерегешевского месторождения: I, II, III, IV, V – проекции рудных тел участков «Главный», «Болотный», «Новый Шерегеш», «Подрусловый», «Новая Промплощадка»; 1, 2, 3, 4, 5 – границы, соответственно, провала, зоны обрушения, зоны трещин, зоны опасных сдвижений, мулдьы сдвижения; л. I-I – название профильной линии

В традиционных геодезических наблюдениях за сдвижением земной поверхности и массива горных пород используются точные нивелиры с компенсаторами (Н-3К, АТ-20D), жесткие отвесы с уровнями, компарированные рулетки (РК-50, WR-650, TSP 50/2) и нивелирные рейки с уровнями. Данный инструментарий позволяет проводить измерения сдвижений участков массива, соизмеримых с размерами шахтного поля.

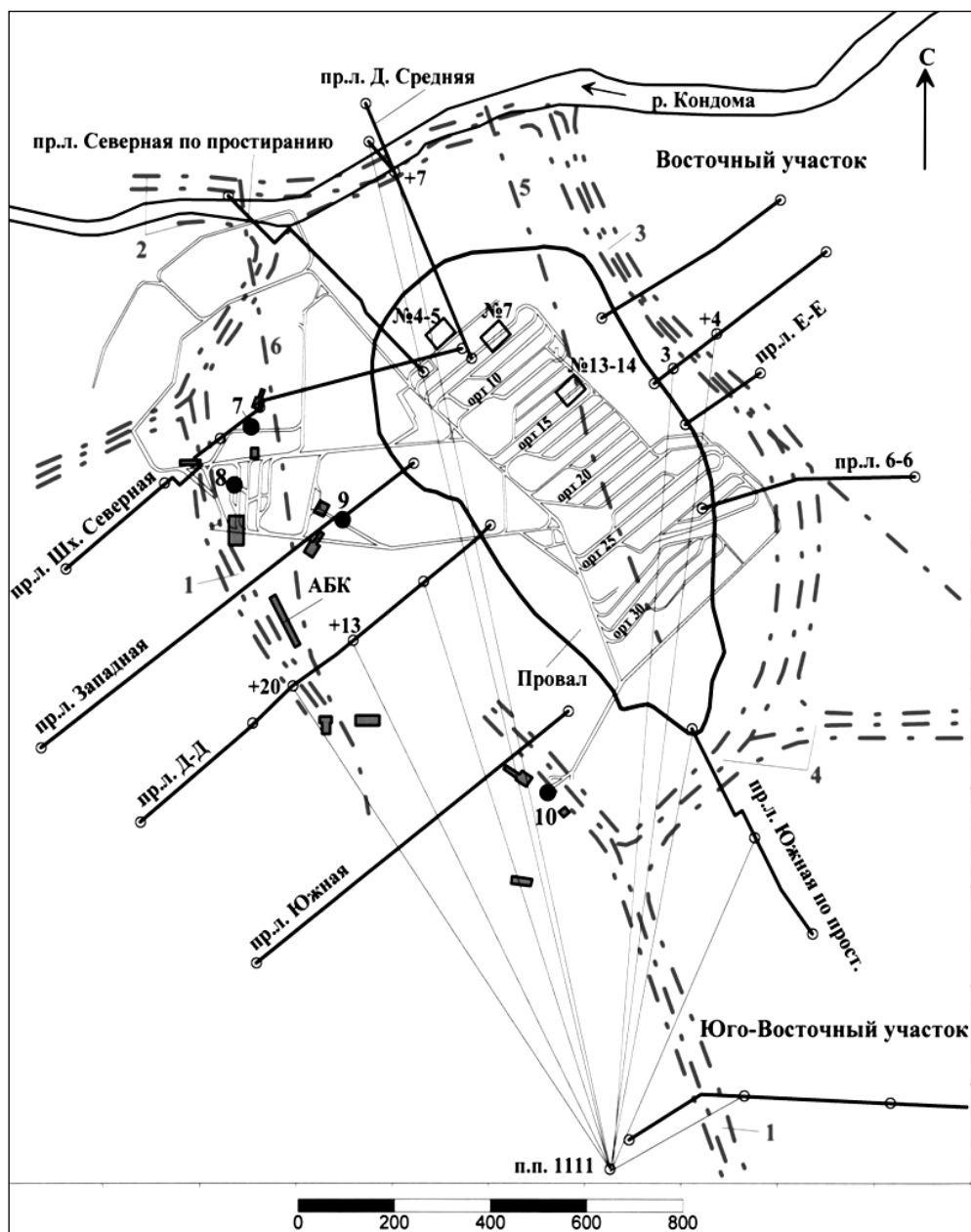


Рис. 2. Схема геодинамического полигона для наблюдения активности разломов в районе Таштагольского месторождения: 1, 2, 3, 4, 5 – разломы, соответственно, «Холодный», «Кондомский», «Нагорный», «Шахтерский», «Диагональный»; 6 – субмеридиональное тектоническое нарушение; 7, 8, 9, 10 – шахтные стволы, соответственно, «Северный», «Ново-Капитальный», «Западный», «Южный»; № 4-5, № 7, № 13-14 – проекции очистных блоков на план горных выработок гор. -280 м; пр.л. – профильные линии; АБК – административно-бытовой комбинат шахты

В наблюдениях за сдвигами земной поверхности в районе тектонических разломов используется GPS технология и оборудование. Съёмка ведется по десяти направлениям, охватывающим все разломы и субмеридиональное

тектоническое нарушение. Комплекс оборудования состоит из четырех приемников фирмы Trimble серии 4600 LS. За базовую точку, относительно которой выполняются измерения, взят пункт полигонометрии (п.п.) 1111, находящийся в Юго-Восточном геодинамическом блоке вне зоны влияния горных работ.

Мобильные приемники перемещаются по пунктам наблюдений (в районе разломов) при длине базовых линий от 70 до 2200 м. В каждом пункте накопление данных от спутников производится в течение 3–9 часов в быстро-статическом режиме, с периодичностью съема показаний 15 сек. Полученные данные обрабатываются по стандартной методике. Далее вычисляются координаты X , Y , Z , расстояния и превышения между реперами. Как правило, ошибка при определении положения реперов не превышает 2 мм в плане и 3 мм по высоте.

Для примера рассмотрим фрагменты наблюдений на Таштагольском полигоне по исследованию влияния массовых взрывов на деформирование земной поверхности в районах охраняемых объектов и глубинных разломов. Так при взрыве 11.06.2012 г. блока № 7 в этаже (-280) – (-210) м (масса заряда 129.6 т ВВ) сейсмостанцией шахты было зарегистрировано 156 толчков с энергетическим классом от 1.0 до 6.3. Графики смещения GPS-пунктов в 20-ти минутные интервалы времени (в первые 6 часов после взрыва) показали уровень и изменчивость смещений во времени как по величине, так и по направлению смещений.

Данные графики были сопоставлены с аналогичными после массового взрыва 05.06.2011 г. при обрушении западной части блока № 4-5 в этаже (-210) – (-140) м (масса заряда 163.0 т ВВ), который ощутимо проявился на земной поверхности. Тогда в первые шесть часов после взрыва сейсмостанция зарегистрировала 82 толчка с энергетическим классом от 1.0 до 5.5. Величины смещений в период взрыва блока № 7 оказались в 2 – 2.5 раза меньшими, чем после взрыва блока № 4-5, хотя энергетический отклик массива, выраженный графиком класса сейсмособытий, оказался более существенным. При этом оказалось, что графики сдвижений контрольных реперов, расположенных в различных частях зоны влияния горных разработок и на различном удалении от места взрыва, в основном повторили друг друга. Этот факт указывает на определяющее влияние процессов перераспределения напряжений в массиве горных пород на развитие смещений земной поверхности после взрыва.

По аналогичной методике были выполнены наблюдения при взрыве блоков № 13-14 и подсечки блока № 12 в этаже (-350) – (-280) м 15.09.2013 г. (масса заряда 149.6 т ВВ). Одновременно со взрывом зафиксирован микроудар и далее около 100 сейсмособытий с энергетическим классом от 1.0 до 6.4.

Отмечено, что смещения в период массового взрыва блоков № 13-14 как до, так и после него меньше таковых при массовых взрывах в 2011 и 2012 гг., в то время как энергия взрыва и длительность сейсмического воздействия на породный массив были на порядок выше. Максимальные смещения по реперу +13 профильной линии «Д – Д» после взрыва составили 22 – 28 мм, что вполне закономерно в связи с более близким его расположением к району взрыва. Ми-

нимальные смещения составили 12 – 13 мм. Они зафиксированы на разломе «Холодный» (репер +20 профильной линии «Д – Д») в районе АБК шахты. Таким образом, воздействие данного взрыва на конструкцию здания оказалось незначительным.

Результаты подобных наблюдений в обобщенном виде систематически передаются руководству предприятия, которое использует их при планировании горных работ.

© А. В. Леонтьев, Т. В. Лобанова, 2014

К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

Валерий Егорович Миренков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Андрей Анатольевич Красновский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: visanta@ngs.ru

Для решения проблем управления горным давлением необходимо вести натурные наблюдения за деформированием отрабатываемого пласта, целика и вмещающих пород. Предложена система сингулярных интегральных уравнений, которая позволяет исключить процесс регуляризации при восстановлении граничных условий и механических характеристик.

Ключевые слова: выработка, целик, интегральные уравнения, обратные задачи, граничные условия, пласт полезного ископаемого.

GROUND CONTROL IN STOPING

Valery E. Mirenkov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk 54 Krasny prospect, Dr Eng, Prof, Principal Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)217-06-93, e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Andrey A. Krasnovsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383) 217-06-93, e-mail: visanta@ngs.ru

The proper ground control requires in situ monitoring of deformation in an operating stratum, pillars and host rock mass. The monitoring data are used in solving inverse problems. The authors offer the system of singular integral equations that allow eliminating the process of regularization in reconstruction of boundary conditions and mechanical characteristics.

Key words: excavation, pillar, integral equations, inverse problems, boundary conditions, mineral bed.

В работе обсуждается процесс деформирования массива пород при ведении очистных работ с оставлением целиков¹, т.е. проблема управления горным давлением. Для решения все этих проблем необходимо вести натурные наблюдения за деформированием контура выработки, без чего лишаются реально основы все разговоры об управлении горным давлением. Кроме чисто техниче-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00133).

ских трудностей, ведения натурных наблюдений за деформированием, возникают чисто математические, связанные с некорректностью таких задач и необходимостью их регуляризации. Предложены системы сингулярных интегральных уравнений, связывающих граничные значения компонент напряжений и смещений, позволяющие исключить процесс регуляризации. Рассматриваются примеры численной реализации.

Ведение очистных работ с оставлением целиков является одним из основных способов добычи полезных ископаемых. При этом в целиках различного назначения остается достаточно много полезного ископаемого и для уменьшения его количества возводят искусственные сооружения, выполняющие функции опор. Такие опоры призваны поддерживать кровлю, уменьшать давление на угольный пласт и выполнять еще массу функций и для их создания необходимо знать напряженно-деформированное состояние, возникающее в естественных.

На рис. 1 изображена схема очистных работ с оставлением кусочно-однородного целика и движением лавы влево. При подвигании забоя нагрузка на целик будет меняться, повторяя закономерности оседания кровли. Существенно, что в отличие от известных аналитических решений, деформирование пород кровли и почвы не симметрично и, как правило, смещения кровли больше чем смещения почвы. Эту особенность деформирования будем учитывать через различие упругих характеристик пород кровли и почвы, используя натурные наблюдения за их смещениями. Без экспериментальных данных о смещении нельзя говорить об управлении горным давлением.

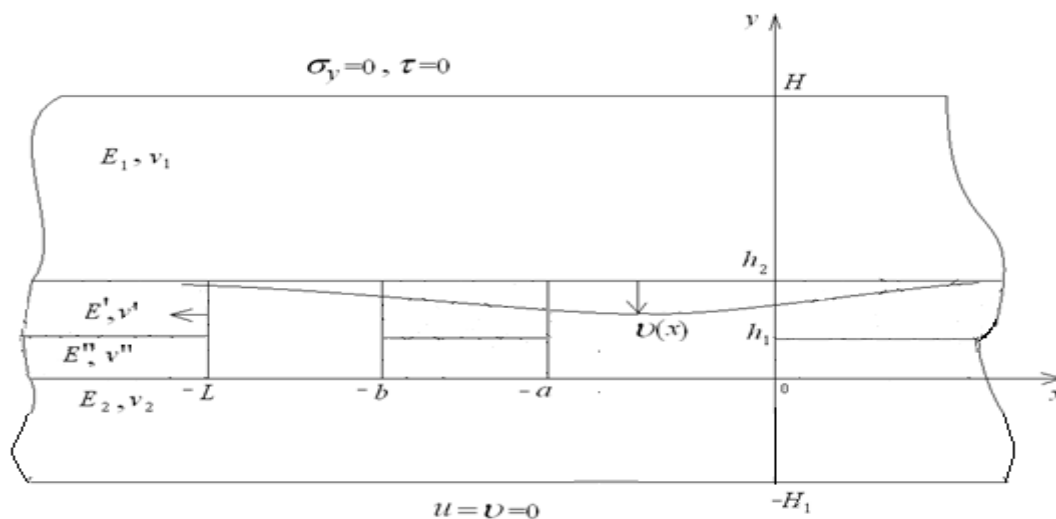


Рис. 1. Расчетная схема очистной выработки с оставлением целика

В работе рассматривается процесс деформирования пород в окрестности выработки, поддерживающих целиков и обрабатываемого пласта полезного ископаемого. Совершенно очевидно, что сформулировать граничные условия на всех контактах раздела свойств в виде предположений об идеальном проскаль-

зывании, абсолютной жесткости пласта, симметрии деформирования не отвечает реальности. Необходимо с началом очистных работ вести наблюдения за смещением пород еще до оставления целика. Это позволит определить в первом приближении приведенные значения модулей Юнга E_1 и E_2 (полагая для простоты коэффициенты Пуассона $\nu' = \nu'' = \nu_1 = \nu_2 = 0.25$) и величины напряжений в нетронутом массиве на момент, когда нет еще расслоения пород, из решения прямых задач.

На глубине выработки в нетронутом массиве пород имеем [1-3]

$$\sigma_y = -\gamma H, \quad \sigma_x = -\lambda \gamma H, \quad (1)$$

где H - глубина разработки, γ - удельный вес пород, λ - коэффициент бокового отпора. Все величины, имеющие размерность длины, отнесены к половине длины выработки, а размерность напряжений - к γH .

Систему сингулярных интегральных уравнений, связывающую граничные значения компонент напряжений и смещений для произвольной односвязной области, следуя [1], запишем в виде

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

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

где $k = 3 - 4\nu$, $\mu = E[2(1 + \nu)]^{-1}$, E - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона;

$$f(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds = \operatorname{Re}(f) + i\operatorname{Im}(f) = f_1 + if_2,$$

X_n, Y_n - компоненты усилий в направлении осей x и y ; $g = u + iv$; u, v - компоненты смещений в направлении осей x и y ; i - мнимая единица; черточка над функцией обозначает комплексно сопряженное значение; Γ - граница рассматриваемой области; t_0 - аффикс точки границы Γ . Эта система уравнений характеризует одновременно и единообразно все три основные задачи теории упругости, которые могут использоваться в той или иной вариации, и используется при моделировании пород кровли и почвы, однородных частей целика и обрабатываемого пласта.

Начнем рассмотрение с целика, когда на бесконечности действуют напряжения $\sigma_y = -1$ и $\sigma_x = -\lambda$. Тогда для боковых граней целика граничные условия имеют вид (рис. 1)

$$\sigma_x = 0, \quad \tau = 0. \quad (3)$$

Дополнительно к (3) будем иметь натурные замеры касательных и нормальных компонент смещений, т.е.

$$u = u_0(x), \quad v = v_0(x). \quad (4)$$

Другими словами, на боковых гранях целика граничные условия (2), (3) переопределены. На контактах с вмещающими породами неизвестны ни компоненты смещений, ни напряжений. На границе раздела свойств целика предполагается сцепление

$$\sigma_y^+ = \sigma_y^-, \quad \tau^+ = \tau^-, \quad u^+ = u^-, \quad v^+ = v^-, \quad (4)$$

т.е. непрерывность нормальных и касательных компонент напряжений и смещений. При достижении касательными напряжениями некоторого предельного значения, возможно учесть проскальзывание на этих участках, что можно определить по скачкам смещений $u_0(x)$ из (3) на границе раздела свойств целика.

На момент оформления целика по смещениям боковых граней его решаются обратные задачи по идентификации граничных условий на контакте целика с вмещающими породами, упругих характеристик частей, составляющих его, следуя [4]. Остановимся на анализе деформирования целика от момента его оформления и до его нагружения, когда забой существенно удалится. Рассчитывались различные варианты граничных условий на контакте целика с вмещающими породами, что позволяет выделять основную часть деформирования контура и определять первое приближение при решении обратных задач. Для демонстрации на рис. 2 представлено напряженно-деформированное состояние целика в виде зависимостей f, u, v от y , отвечающего граничным условиям

$$u(x) = -0.1, \quad v(x) = 0 \quad \text{на } y = h; \quad (5)$$

$$u(x) = 0, \quad v(x) = 0 \quad \text{на } y = 0.$$

На рис. 2 а,б приведены значения u, v и $Im(f)$ соответственно для $x = -a$ и $x = -\frac{a+b}{2}$ (рис. 1). Производные от $Im(f)$ определяет $\sigma_x(y)$. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют различным значениям $E'' = 3E'$, $E'' = 2E'$ и $E' = 3E''$. На $y = h$ компоненты σ_y растягивающие в левой половине, в правой сжимающие. Для $y = 0$ картина $\sigma_y(x)$ меняется на обратную – в левой части сжимающие, а в правой половине растягивающие. Касательные напряжения в центральной части целика близки к нулю и возрастают с удалением от центра.

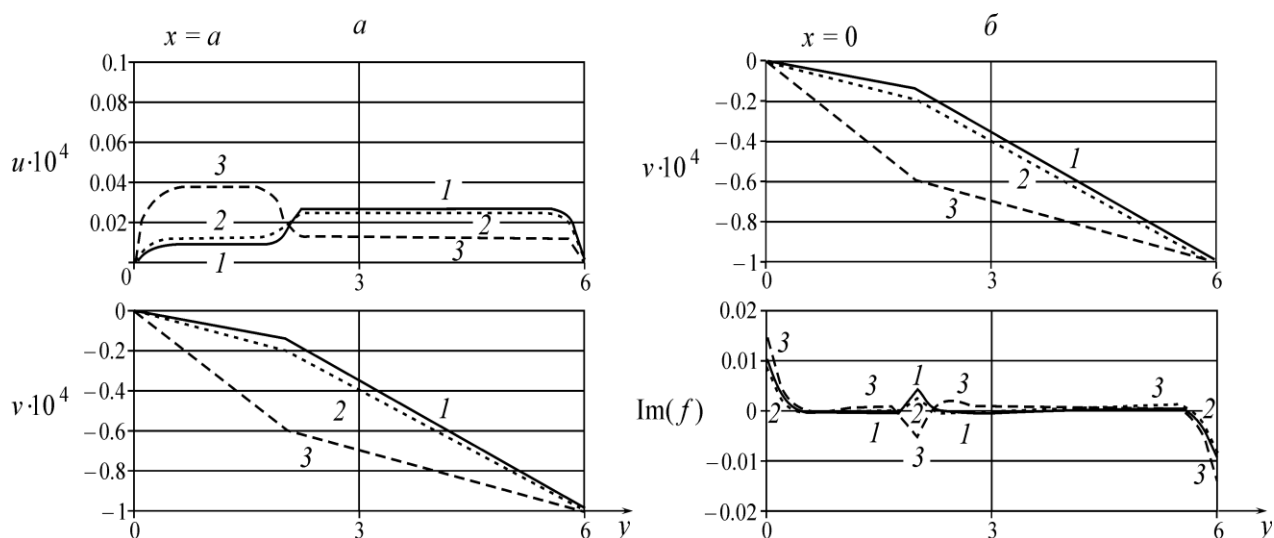


Рис. 2. Деформирование кусочно-однородного блока пород:

a — компоненты смещений на $x = a$;
 b — компоненты смещений и напряжений на $x = 0$

Для очистной выработки, задавая на участках типа $a \leq x \leq b$ вычисленные контактные усилия, решаем согласно [1] прямую задачу по определению давления на пласт полезного ископаемого. По деформированию границы пласта $x = 0, 0 \leq y \leq h$ определяются механические свойства частей пласта.

Рассмотрим очистную выработку протяженностью $L = 2$ и угольный пласт мощностью $h = 0.4$ при отсутствии целика. В первом приближении положим, что пласт однородный ($E' = E'' = E, \nu' = \nu'' = \nu$). Для трехслойного массива пород с выработкой, следуя [1], определяем компоненты напряжений и смещений на контактах пласта с вмещающими породами, т.е.

$$Re(f_1), Im(f_1); u_1(x), v_1(x) \text{ на } y = h; \quad (6)$$

$$Re(f_2), Im(f_2); u_2(x), v_2(x) \text{ на } y = 0.$$

Аналогично тому, как это делалось в [4], из решения прямых задач определялись в первом приближении значения E_1, E_2 , по которым вычисляются значения (6) и используются для расчета деформирования отрабатываемого угольного пласта.

Таким образом, рассмотрен метод решения прямых задач для кусочно-однородного массива пород с выработкой в предположении сцепления на контактах пород с угольным пластом и целиком, которое не является принципиальным и легко заменяется на любое другое. Развита идеология для решения переопределенных задач, сводящаяся к формулировке и решению последовательными приближениями обратных проблем по идентификации механических характеристик массива пород с выработкой и целика, исходного поля напряже-

ний в нем, что позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние в процесс отработки пласта на любой момент времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миренков В.Е. Контактные задачи в механике горных пород // ФТПРПИ. – 2007. – № 4. – С. 36-48.
2. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом // Изв. АН СССР. ОТН. – 1942. – № 7-8. – С. 13-28.
3. Баренблатт Г.И., Христианович С.А. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. ОТН. – 1955. – № 11. – С. 73-86.
4. Миренков В. Е. идентификация границы раздела и механических свойств частей блока пород // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 115–119.

© В. Е. Миренков, А. А. Красновский, 2014

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ГИДРОМОЛОТОВ ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГОРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Леонид Владимирович Городилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования импульсных систем, тел. (383)217-02-41, e-mail: gor@misd.nsc.ru

Виталий Геннадьевич Кудрявцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории моделирования импульсных систем, тел. (383)217-08-80, e-mail: vit22@ngs.ru

Ольга Александровна Пашина

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории моделирования импульсных систем, тел. (383)217-08-80, e-mail: paola@ngs.ru

Приводится обзор теоретических и экспериментальных исследований гидроударных систем объемного типа, ведущихся в Институте горного дела СО РАН. В среде проектирования Solid Works разработана 3D-модель гидромолота с регулируемыми параметрами (энергией удара 0.2–1 кДж, частотой 1–20 Гц), предназначенного для навески на экскаватор 2-й размерной группы. Оценивается возможность создания такого устройства и перспективы работ в этом направлении.

Ключевые слова: гидромолот, теория гидроударных систем, критерии подобия, характеристики, распределитель, регулируемые энергия и частота ударов.

DEVELOPMENT AND DESIGN OF HYDRAULIC HAMMERS FOR EXECUTIVE ELEMENTS OF MINING AND CONSTRUCTION MACHINES

Leonid V. Gorodilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Pulse System Modeling Laboratory, tel. (383)217-02-41, e-mail: gor@misd.nsc.ru

Vitaly G. Kudryavtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Pulse System Modeling Laboratory, tel. (383)217-08-80, e-mail: vit22@mail.ru

Olga A. Pashina

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Pulse System Modeling Laboratory, tel. (383)217-08-80, e-mail: paola@ngs.ru

The article reviews theoretical and experimental studies of 3D hydraulic percussion systems at the Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. In Solid Works design environment, the authors have constructed 3D model of a hydraulic hammer with ad-

justable parameters (blow energy 0.2–1 kJ, blow frequency 1–20 Hz) to be hinged on a 2nd size group shoveling machine. Under analysis is feasibility of creating such hammer and epy prospects for continuation of the research.

Key words: hydraulic hammer, theory of hydraulic percussion systems, similarity criteria, characteristics, distributor, adjustable blow energy and frequency.

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых и совершенствование существующих технологий разрушения горных пород является актуальной научно-технической задачей. Перспективное направление здесь — использование горных машин с активными исполнительными органами: экскаваторов с навесными молотами и ковшами активного действия, динамических стругов и горнопроходческих комбайнов с навесными молотами. Применение гидромолотов или гидроударных систем в данном случае по КПД и мощности не имеет альтернативы.

Исследования гидроударных систем, проводившиеся в нашей стране с середины прошлого века существенного практического выхода не дали, до сих пор не создано эффективной выпускаемой серийно машины с характеристиками, сравнимыми с зарубежными аналогами. Их анализ показал, что в определенной степени такое положение связано с проблемами, существующими в теории и методах расчета гидроударных систем.

В последнее десятилетие в Институте горного дела СО РАН ведутся интенсивные работы по исследованию и созданию эффективных моделей гидромолотов для горнодобывающей промышленности и строительства. К настоящему времени разработаны основы теории гидроударных систем объемного типа [1–3], созданы программы расчета и оптимизации их параметров [4], создан ряд физических моделей устройств с оригинальной системой распределения [5], позволяющей регулировать энергию и частоту ударов, проведены их испытания и доводка, регистрация характеристик. Разработана трехмерная модель гидроударного устройства для экскаватора 2-й размерной группы.

О ТЕОРИИ ГИДРОУДАРНЫХ СИСТЕМ

При разработке теории использовали расчетную схему автономной гидроударной системы с источником постоянного расхода. На ее основе были построены математические модели основных классов автоколебательных гидроударных систем [6], в которых практически всегда принимали параметры элементов — сосредоточенными; жидкость — идеальной и несжимаемой; распределитель — идеальным (переключающимся мгновенно и без потерь); взаимодействие бойка с инструментом — мгновенным и характеризующимся коэффициентом восстановления скорости R .

На рис. 1 для примера представлена расчетная схема системы двухстороннего действия с двумя управляемыми камерами, включающая ударное устройство $УУ$ (боек и жестко закрепленный корпус), жесткий ограничитель O , газо-

жидкостный аккумулятор A_k , распределитель P и источник постоянного расхода (насос) H .

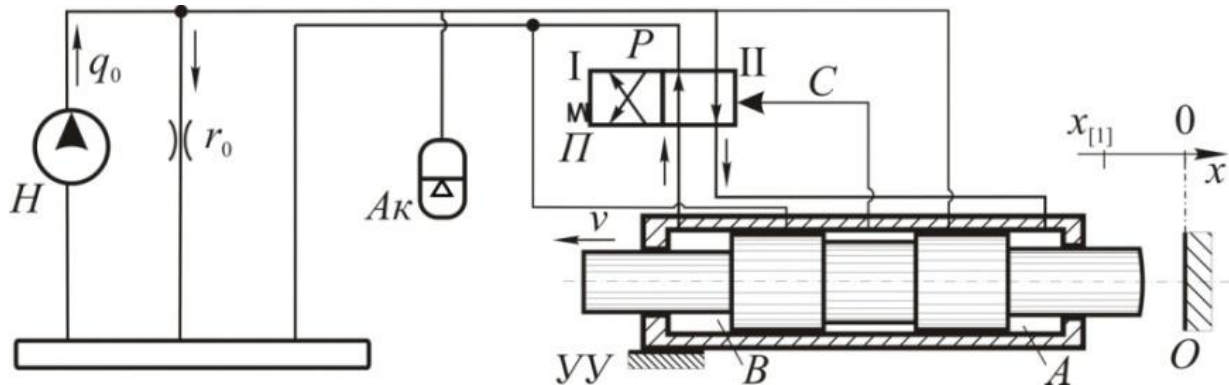


Рис. 1. Принципиальная схема гидроударной системы:

H — насос, A_k — аккумулятор, P — распределитель, $УУ$ — ударный узел, O — ограничитель, $П$ — пружина; A и B — соответственно камеры обратного и прямого хода $УУ$, C — управляющая линия распределителя P (при координате бойка $x < x_{[1]}$ — C соединена со сливной линией, при координате бойка $x = 0$ — с напорной)

Представленная модель дает возможность физически достоверно описывать основные свойства объемной системы. Переход к безразмерным параметрам позволяет выбрать динамические критерии подобия (σ_0 — отношение эффективных площадей бойка со сторон камер обратного и прямого хода, σ_1 — отношение энергии аккумулятора к кинетической энергии бойка при заданных параметрах системы, $\bar{x}_1$ — безразмерная длина фазы обратного хода) и в их пространстве численно исследовать динамику и выходные характеристики предельных циклов (предударную скорость $\bar{v}_l^*$ и частоту ударов $\bar{f}^*$, энергию $\bar{E}^*$, КПД η^* и мощность $\bar{N}^*$) ударной системы.

Такой подход применим к различным классам систем, позволяет исследовать и сравнивать между собой их свойства, на его основе разработана методика и проведены экспериментальные исследования [5, 7], подтверждающие полученные в теории положения. Результаты положены в методику выбора основных параметров гидроударных устройств, которые могут быть использованы как исходные данные при разработке технического проекта устройства, затем при построении его имитационной модели, позволяющей с применением процедуры многомерной оптимизации произвести корректировку исходных параметров [4].

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОУДАРНОГО УСТРОЙСТВА, ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 2 представлена фотография гидроударного устройства двухстороннего действия с управляемой камерой прямого хода с возможностью за-

держки движения бойка в начале обратного хода (движение начинается после достижения давлением в системе величины p_3 — давления задержки).

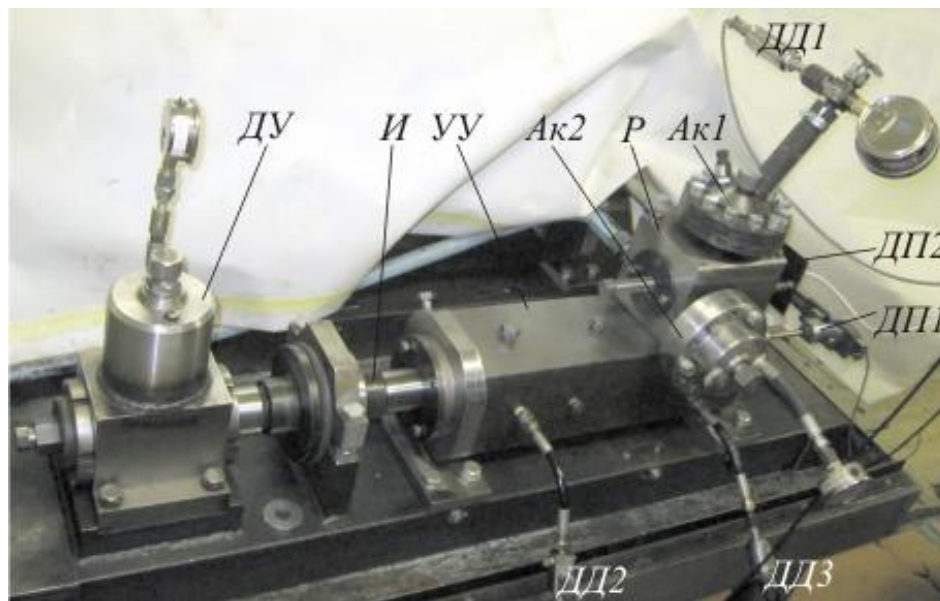


Рис. 2. Фотография стенда и физической модели:

УУ — ударный узел, Ак1 и Ак2 — напорный и сливной аккумуляторы, Р — распределитель, И — инструмент (ограничитель), ДУ — демпфирующее устройство, ДП1, ДП2 — датчики перемещения, ДД1, ДД2, ДД3 — датчики давления

Подробное описание стенда и методик измерения характеристик можно найти, например, в [5, 7]. Отметим, что источником жидкости служила маслостанция с регулируемой подачей (до 25 л/мин), максимальное давление в системе достигало 8.7 МПа. Для регистрации сигналов датчиков использовали АЦП Е-440, программу PowerGraph и персональный компьютер.

В гидроударном устройстве используется оригинальный распределитель, конструкция которого позволяет регулировать энергию удара при помощи задержки движения бойка в начале фазы обратного хода.

С целью определения режимных характеристик проведены испытания, в которых использовали бойки массами 6.27 (1-й боек), 6.3 (2-й) и 6.33 (3-й) кг с эффективными площадями со стороны камеры прямого хода соответственно 6.8, 5.1 и 3.5 см² и — камеры обратного хода — 1.79 см², одинаковой для всех бойков. В устройстве можно было устанавливать две длины фазы обратного хода бойка x_1 : 3 и 5.5 см и изменять давление задержки p_3 от 4.5 до 8.5 МПа.

Испытания показали устойчивую работу устройства практически во всех режимах. В таблице представлены некоторые результаты опытов при длине фазы обратного хода бойка $x_1 = 5.5$ см: изменение предударной скорости бойка v_I^* при изменении давления задержки p_3 и изменение частоты ударов f^* при изменении расхода q_0 , подаваемого к устройству.

Характеристики ударного устройства

№ бойка	p_3 , МПа	v_I^* , м/с	q_0 , л/мин	f^* , с ⁻¹
1	5.45 – 8.80	4.6 – 6.0	3.48 – 23.38	0.78 – 8.58
2	4.6 – 8.35	4.15 – 5.94	5.0 – 25.18	1.2 – 11.36
3	5.12 – 7.82	2.6 – 4.48	3.46 – 23.53	1.4 – 14.2

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОУДАРНОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ЭКСКАВАТОРА 2-Й РАЗМЕРНОЙ ГРУППЫ

На рис. 3а представлена 3D-модель гидромолота с энергией удара до ~1.1 кДж, предназначенного для экскаватора 2-й размерной группы. Модель выполнена в среде проектирования SolidWorks, при расчетах ее параметров использовали результаты проведенных нами теоретических и экспериментальных исследований. В корпусе распределителя кроме золотника располагаются напорный и сливной аккумуляторы, на верхней крышке — штуцеры подключения напорной и сливной линий маслостанции экскаватора.



Рис. 3. 3D-модель гидромолота (а), его характеристики (б) и навеска (в) на экскаватор 2-й размерной группы на базе трактора Беларусь

На рис. 3в изображена его навеска на экскаватор на базе трактора Беларусь. При применении сменных рабочих инструментов возможно его использование в горном деле (разделка негабаритов, добыча блочного камня), сейсмологии (генератор сейсмических волн), городском хозяйстве и строительстве (вскрытие асфальтобетонных покрытий, разрушение мерзлых грунтов и другое).

Особенностью спроектированного гидроударного устройства является простота и надежность распределительного устройства, возможность регулирования в широком диапазоне энергии и частоты ударов (рис. 3б). Основные узлы гидромолота защищены патентами Российской Федерации.

ВЫВОДЫ

В докладе отражены результаты в разработке теории и практики гидроударных систем, полученные в лаборатории моделирования импульсных систем Института горного дела СО РАН.

Представленные наработки позволяют уверенно утверждать, что уже сейчас возможно при сравнительно небольших затратах реализовать работы по созданию серийного образца гидроударного устройства с энергией удара до 1.1 кДж, предназначенного в качестве навесного оборудования для экскаватора 2-й размерной группы.

Успешная реализация такого проекта позволит приступить к разработке и созданию типоразмерного ряда устройств, способных по своим характеристикам конкурировать с зарубежными аналогами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Городилов Л. В. Разработка основ теории гидроударных систем объемного типа для исполнительных органов горных и строительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 42 с.
2. Городилов Л. В. Исследование динамики гидроударных объемных систем двухстороннего действия. Ч. I: Основные свойства // ФТПРПИ. – 2012. – № 3. – С. 91-101.
3. Городилов Л. В. Исследование динамики гидроударных объемных систем двухстороннего действия. Ч. II: Влияние на характеристики предельных циклов конструктивных особенностей устройств и условий их взаимодействия с горным массивом // ФТПРПИ. – 2013. – № 3. – С. 127-138.
4. Городилов Л. В., Вагин Д. В., Пашина О. А. Разработка методики выбора параметров гидроударных систем объемного типа // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 87-94.
5. Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г., Пашина О. А. Стенд и методика экспериментальных исследований гидроударных систем // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – С. 54-63.
6. Городилов Л. В., Фадеев П. Я. Анализ и классификация эффективных конструктивных схем автоколебательных гидравлических ударных систем // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностр. ученых (10-13 октября 2006 г.): в 2 т. – Новосибирск : Ин-т горного дела СО РАН, 2007. – Т. 2. – С. 71-79.
7. Городилов Л. В., Ефимов В. П., Кудрявцев В. Г. Моделирование процесса взаимодействия системы «боек-инструмент» с горным массивом на стенде // ФТПРПИ. – 2013. – № 4. – С. 116-124.

© Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев, О. А. Пашина, 2014

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОМАШИН ПРИ ВЫПУСКЕ ГОРНОЙ МАССЫ ИЗ АККУМУЛИРУЮЩИХ ЕМКостей

Самуил Яковлевич Левенсон

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией вибротехники, тел. (383)217-06-76, 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)217-06-12, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Владимир Михайлович Усольцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)220-14-98

Представлены результаты исследования процесса вибровыпуска геоматериалов, в том числе связных, из различных емкостей и показаны пути повышения эффективности вибромашин, предназначенных для этой цели.

Ключевые слова: вибрационный питатель, вибровыпуск, геоматериал, связные материалы, сцепление.

GAIN IN PERFORMANCE OF VIBRATION MACHINES IN ROCK DISCHARGE FROM ACCUMULATING TANKS

Samuil Ya. Levenson

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk 54 Krasny prospect, PhD Eng, Head of Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)217-06-76, e-mail: lev@misd.nsc.ru

Lyudmila I. Gendlina

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)217-06-12, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Vladimir M. Usoltsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)220-14-98

The article reports the studies into the process of vibration discharge of geomaterials, including coherent materials, and shows ways of improving performance of the associated vibration machines.

Key words: vibration feeder, vibration discharge, geomaterial, coherent materials, cohesion.

На предприятиях горнодобывающей промышленности значительный объем перерабатываемых материалов складывается в накопительных емкостях: бункерах, рудоспусках, блоках с последующим их выпуском в средства доставки питателями различных конструкций, среди которых широко используются вибропитатели. Вибрационный способ выпуска в сравнении с гравитационным позволяет, не изменяя размеров выпускных отверстий, существенно увеличить их проходимость, уменьшить количество зависаний и улучшить санитарно-гигиенические условия труда горнорабочих.

В ряду вибрационной техники, используемой для выпуска и доставки материалов, известны виброустройства с упругим рабочим органом, созданные в Институте горного дела СО РАН [1]. Эти вибромашины имеют более широкие возможности для реализации различных режимов транспортирования и значительно меньшую металло- и энергоемкость.

Результаты исследования выпуска сыпучей массы вибропитателями этого класса показали, что, если грузонесущая поверхность в загрузочной (заглубленной) части выполнена криволинейной, то создаются более благоприятные условия для движения материала. В таком случае указанный участок превращается в искусственную поверхность скольжения, вдоль нее сдвиговая прочность ниже, чем вдоль поверхностей скольжения, возникающих в транспортируемом материале. С криволинейным рабочим органом выполнены вибропитатели типа "Волна", которые используются для выпуска сыпучих материалов из различных емкостей в транспортные средства. Простота конструкции и несложный монтаж этих питателей стали определяющими факторами для их широкого использования на подземных предприятиях горнорудной промышленности.

На рис. 1 в качестве примера показана схема питателя "Волна-4П", используемого для выпуска руды из блока.

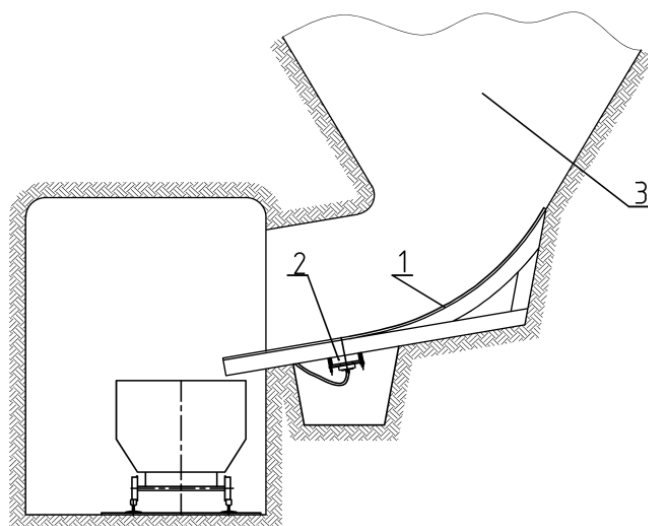


Рис. 1. Схема установки вибропитателя "Волна-4П" в горной выработке

1 – рабочий орган; 2 – вибровозбудитель; 3 – накопительная емкость

В условиях добычи полезных ископаемых открытым способом применение вибротехники, в том числе вибрационных питателей, пока ограничено. Тем не менее, в настоящее время имеется некоторый опыт эксплуатации перегрузочных пунктов с вибротехникой как в нашей стране, так и за рубежом.

Исследования, выполненные в ИГД СО РАН, показали, что хороший результат может быть получен при использовании на перегрузочных пунктах угольных карьеров бункеров большой емкости с вибрационным выпуском. Испытания таких перегрузочных узлов, оборудованных вибрационными питателями "Волна-8", успешно проведены на карьерах Кузбасса при погрузке горной массы в думпкары (рис. 2), а также при перегрузке из автомобильного в железнодорожный транспорт (рис. 3).



Рис. 2. Бункерно–экскаваторный перегрузочный пункт



Рис. 3. Перегрузка горной массы из автомобильного в железнодорожный транспорт

При виброперемещении горной массы с малым сцеплением проблем, как правило, не возникает. Однако выпуск из аккумулирующих емкостей (рудоспусков, блоков, бункеров) материалов с существенным содержанием глинистой составляющей сопровождается налипанием выпускаемой массы на рабочий орган, образованием сводов и полостей, при этом резко снижается скорость перемещения вплоть до остановки процесса. В общем случае выпуск связных материалов сложно осуществить и любым другим способом.

Связные сыпучие среды характеризуются существенными по величине силами сцепления между частицами, и при перемещении такой массы сопротивление сдвигающим усилиям оказывает не только внутреннее трение, но и силы сцепления.

Были проведены эксперименты, цель которых заключалась в определении закономерностей изменения реологических характеристик связного материала под действием вибрации [2]. Установлено, что при воздействии на него вибрационными нагрузками даже сравнительно небольшой интенсивности (до 5 м/с^2) изменяются как сцепление, так и коэффициент внутреннего трения. Эксперимент показал, что если связность невелика, то сопротивление сдвигу под дей-

ствием вибрации уменьшается в основном за счет снижения сцепления, коэффициент внутреннего трения при этом почти не изменяется. С увеличением связности материала вибрация вызывает рост коэффициента внутреннего трения и падение сцепления, причем, изменение сцепления значительно существеннее, чем коэффициента внутреннего трения. Полученные результаты позволяют утверждать, что вибрация, уменьшая сопротивление сдвигу, создает достаточно благоприятные условия для его перемещения, однако для их реализации требуется принципиально изменить режим вибрационного воздействия на горную массу.

В машинах с упругим рабочим органом процесс вибрационного перемещения реализуется за счет поперечных колебаний грузонесущей плоскости. Под нагрузкой эти колебания затухают как вдоль самой плоскости в обе стороны от вибровозбудителя, так и вглубь перемещаемого материала. Поэтому на загрузочном участке амплитуда колебаний существенно меньше, чем на участке приложения вынуждающей силы.

Если сохранить прежний режим вибрационного воздействия и при работе со связными средами, то, как показывают наблюдения за процессом, в начальный период выпуска заметно движение материала только над виброисточником, на загрузочном участке оно отсутствует до тех пор, пока не освободится разгрузочная часть рабочего органа. Процесс отличается нестабильностью, частыми зависаниями, уплотнением материала на загрузочном участке.

Но, несмотря на сложности выпуска таких материалов, задача может быть успешно решена с помощью вибрационных устройств с упругим рабочим органом. Результаты проведенных исследований [3] показывают, что транспортирование связных материалов обеспечивают режимы, при которых реализуются не только поперечные, но и продольные колебания рабочего органа виброустройства. В этом случае в работу включается загрузочный участок и осуществляется равномерное перемещение сыпучей массы по всей длине грузонесущей поверхности.

Конструктивно это может быть достигнуто, например, за счет использования системы упругих опорных элементов для закрепления рабочего органа на жесткой раме. Опорные элементы размещаются на концевых участках виброустройства и работают на изгиб.

Эксперименты показали, что такая конструктивная схема обеспечивает существенное (в 3,5–4 раза) увеличение амплитуды колебаний загрузочного участка рабочего органа (рис. 4), и, как следствие, рост скорости перемещения связного материала на этом участке, что создает условия для достаточно стабильного и равномерного его движения по всей транспортирующей поверхности виброустройства. Используя результаты исследований, разработано несколько вариантов конструктивных схем виброустройств для выпуска горной массы из емкости, одна из них показана на рис. 5. Вибрационный питатель "Волна – 1,5М" предназначен для выпуска различных геоматериалов, в том числе с существенным сцеплением, из аккумулирующих емкостей технологических комплексов предприятий горной, металлургической и других отраслей

промышленности. В настоящее время разработан его эскизный проект, в котором реализована новая конструктивная схема.

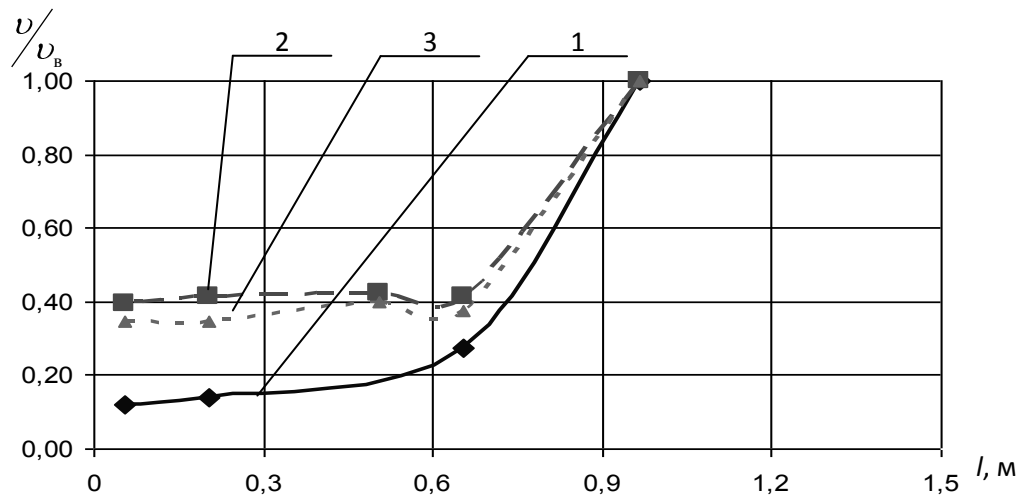


Рис. 4. Распределение безразмерной амплитуды виброскорости вдоль нагруженного рабочего органа:

1 – без опорных элементов; с опорными элементами жесткостью на изгиб:
2 – $2.31 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$, 3 – $5.77 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$

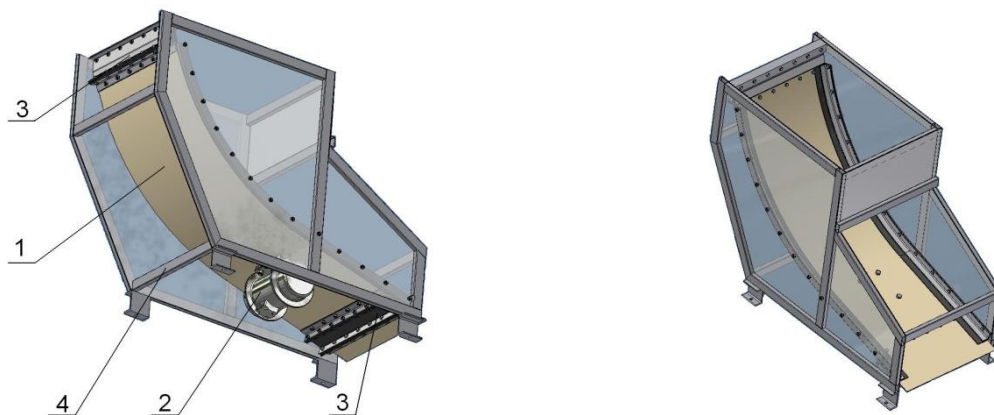


Рис. 5. Вибрационный питатель "Волна-1,5М"

1 – рабочий орган; 2 – вибровозбудитель; 3 – опорные элементы; 4 – рама

Таким образом, повысить эффективность выпуска сыпучих геоматериалов, в том числе с существенным сцеплением, можно, реализовав режимы, обеспечивающие повышение амплитуды колебаний загрузочного участка рабочего органа, что способствует возрастанию скорости движения горной массы на этом участке и достаточно равномерному перемещению ее по всей длине грузонесущей поверхности.

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. 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.
- 3 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. – 2013. – №1 – С.43–46.

© С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, В. М. Усольцев, 2014

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНОГО МЕХАНИЗМА ПРИ НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией подземной строительной геотехники и геотехнологий, тел. (383)217-01-33, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Данила Александрович Воротников

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)217-09-96, e-mail: vdanila@yandex.ru.

Рассматриваются особенности работы погружного пневмоударного механизма в процессе бурения наклонных и горизонтальных скважин. Основное внимание уделено анализу влияния работы пневмотранспортной системы на динамику рабочего цикла бесклапанных пневмоударных механизмов с одной и двумя управляемыми камерами.

Ключевые слова: скважина, давление, выхлопной тракт, пневмотранспорт, энергия ударного импульса.

SELECTION CRITERIA FOR BASIC DIAGRAM OF DOWNHOLE AIR-PERCUSSION MACHINE IN DIRECTIONAL HOLE DRILLING

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Underground Construction Geotechnics and Geotechnology, tel. (383)217-01-33, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Danila A. Vorotnikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Laboratory for Underground Construction Geotechnics and Geotechnology, tel. (383)217-09-96, e-mail: vdanila@yandex.ru

In focus is the operation of a downhole air-percussion machine in inclined and horizontal drilling. The main attention is given to the analysis of the influence exerted by the air transport channel on the dynamics of the duty cycle of valveless air-percussion machines with one and two controllable chambers.

Key words: hole, pressure, exhaust line, air transport channel, impact impulse energy.

Проходка протяженных скважин – важнейшая составляющая технологий разработки месторождений полезных ископаемых как подземным, так и открытым способами. Она широко используется в технологиях сооружения подземных коммуникационных объектов и сооружений без вскрытия породного массива и т.п. Наиболее универсальным методом проходки скважин является буре-

ние. В последние десятилетия ускоренное развитие получили технологии направленного бурения, позволяющие прокладывать вертикальные, горизонтальные и наклонные скважины по заданной траектории с выходом в нужную область подземного пространства.

Эффективным способом повышения производительности и расширения диапазона технических возможностей бурового процесса является использование динамического ударного и ударно-вращательного – разрушающего воздействия на породный массив. Наилучшие результаты при этом достигаются при использовании погружных ударных машин. Расположение источника рабочих усилий непосредственно в забойной зоне позволяет максимально повысить эффективность их действия за счет устранения потерь энергии в передаточных звеньях. Не случайно такое направление развития буровой технологии и оборудования наблюдается у ведущих зарубежных компаний. В микротоннельных комплексах крупнейшего мирового производителя проходческого оборудования "HERRENKNECHT" вращательный силовой привод инструмента и механизмы изменения траектории, чаще всего, располагаются в передней части устройства непосредственно возле породоразрушающего инструмента [1,2] (рис. 1).

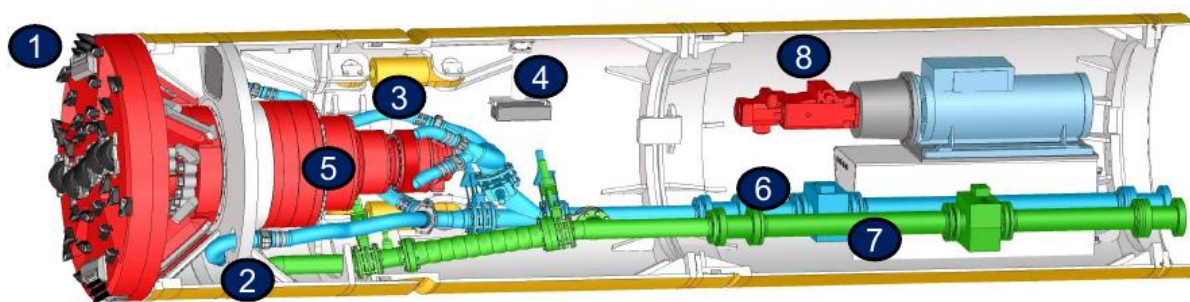


Рис. 1. Проходческие установки с гидротранспортом грунта (Herrenknecht):

- 1 – режущий орган, 2 – доступ к режущему органу, 3 – цилиндр управления,
- 4 – лазерная мишень, 5 – привод рабочего органа, 6 – питающая магистраль,
- 7 – транспортная магистраль, 8 – силовой агрегат

Технология бурения включает в себя два основных процесса – разрушение породной массы и удаление ее из скважины. Применение погружных пневмоударных машин позволяет использовать отработанный ими воздух для транспортирования разрушенной породы.

В ИГД СО РАН разработана технология «сухого» горизонтального бурения, в которой используется пневматическое транспортирование разрушенной породы по вращающемуся трубопроводу. За счет этого повышается эффективность и надежность работы пневмотранспортной системы, что является особенно актуальным при бурении горизонтальных и полого наклонных скважин. Необходимость такого решения вытекает из физической сущности процесса транспортирования посредством воздушного потока.

С помощью воздуха по трубам транспортируют в основном сыпучие мелкозернистые (зерно, гранулированные удобрения, шлак) и пылевидные грузы (цемент, мука, сажа, сода, порошки металлов и др.). Продукт бурения транспортировать значительно сложнее, так как размеры, форма и масса породных частиц могут изменяться в широких пределах. Кроме того, прокладка скважин часто осуществляется в грунтах с повышенной влажностью. Влажный грунт не обладает свойством сыпучести, а его частицы при механическом контакте слипаются в единую массу. По мере повышения влажности эти свойства, как правило, усиливаются. Транспортирование влажной грунтовой массы по вращающемуся трубопроводу осуществляется порциями определенной величины. Поступающий грунт накапливается в начале трубопровода, пока не заполняет все его сечение, образуя пластичный грунтовый поршень. Вращение трубопровода при этом является важным фактором, способствующим формированию поршня. Далее грунтовый поршень движется внутри трубопровода под действием давления воздуха.

Такое транспортирование имеет иную физическую природу, по сравнению с традиционным принципом транспортирования сыпучих материалов. При порционном транспортировании сыпучесть материала и его влажность в слабой мере влияют на эффективность процесса, что делает такую технологию универсальной и позволяет использовать ее в технологическом процессе горизонтального бурения (рис. 2).



Рис. 2. Начальная, средняя и конечная стадии выхода грунтового поршня из полости вращающегося трубопровода

Особенностью работы порционной пневмотранспортной системы являются значительные колебания давления в трубопроводе. Максимальное давление возникает в момент окончания формирования поршня и начала его движения. Величина давления определяется, в первую очередь, размерами и массой грунтового поршня [3]. Поскольку пневмотранспортная магистраль служит выхлопным трактом для пневмоударной машины, то неизбежно затрудняется выхлоп отработанного воздуха из рабочих камер пневмоударной машины, что влечет за собой ухудшение ее важных энергетических показателей, в том числе энергии и частоты ударных импульсов и расхода воздуха [4].

Величина потерь энергии и частоты ударов, а также уменьшения расхода воздуха зависит от конструктивных особенностей машины и в частности от типа воздухораспределительного механизма. Наиболее критичным для бурового процесса в целом является уменьшение расхода воздуха. Следствием уменьшения энергии удара при действии противодавления, безусловно, будет снижение скорости проходки. Но это одновременно является неким стабилизирующим фактором, так как приводит к уменьшению объема разрушенной породы, поступающей в транспортную систему. В результате произойдет уменьшение противодавления и улучшение динамических параметров рабочего цикла машины.

Уменьшение расхода воздуха приводит к падению скорости транспортирования разрушенной породной массы. Следовательно, повышается концентрация твердой фазы в потоке и увеличивается сопротивление транспортной системы, а, значит, и противодавление в выхлопном тракте машины. Таким образом, уменьшение расхода воздуха является более существенным дестабилизирующим фактором, по сравнению с уменьшением энергии и частоты ударных импульсов.

Характеристика, отражающая зависимость динамических параметров машины от величины противодавления в выхлопном тракте, служит одним из критериев выбора схемы воздухораспределения, поскольку характеризует надежность ее работы совместно с пневмотранспортной системой. Другим важным критерием выбора является надежность запуска машины. В процессе бурения происходят периодические остановки для наращивания буровой колонны, после чего бурение возобновляется. По мере увеличения длины буровой колонны проблема надежного запуска обычно обостряется.

В работах [4, 5] были проведены вычислительные эксперименты на математической модели, задача которых заключалась в определении динамических параметров бесклапанных пневмоударных механизмов в условиях, когда выхлоп воздуха из рабочих камер производится в среду с давлением выше атмосферного. На модели были проведены опыты при значениях $\bar{P}_a$ равных 0,214; 0,286; 0,357. Конструктивные и динамические параметры механизма заданы в безразмерном виде [4]. За единицу давления принята абсолютная величина магистрального давления 0,7 МПа. Атмосферное давление в таком случае соответствует безразмерной величине 0,143. Результаты опытов отражены графически на рис. 3.

Как видно из графика, при увеличении противодавления в выхлопном тракте в два с половиной раза по сравнению с атмосферным давлением, ударная мощность механизма уменьшается в 1,7 раз, а расход воздуха уменьшается в 1,3 раза.

Аналогичным методом в работе [5] проведены исследования динамики пневмоударного механизма с одной управляемой камерой. Результаты вычислительных опытов при различном значении противодавления в выхлопном тракте приведены в графическом виде на рис. 4.

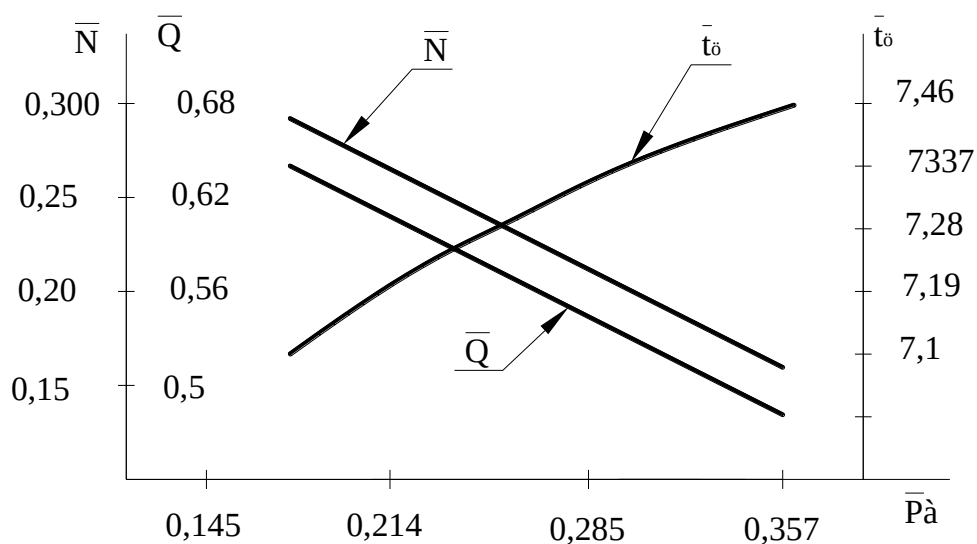


Рис. 3. Зависимость динамических параметров пневмоударного механизма с двумя управляемыми камерами от противодавления в выхлопном тракте:

$\bar{N}$ – ударная мощность, $\bar{Q}$ – расход воздуха, $\bar{t}_0$ – время рабочего цикла

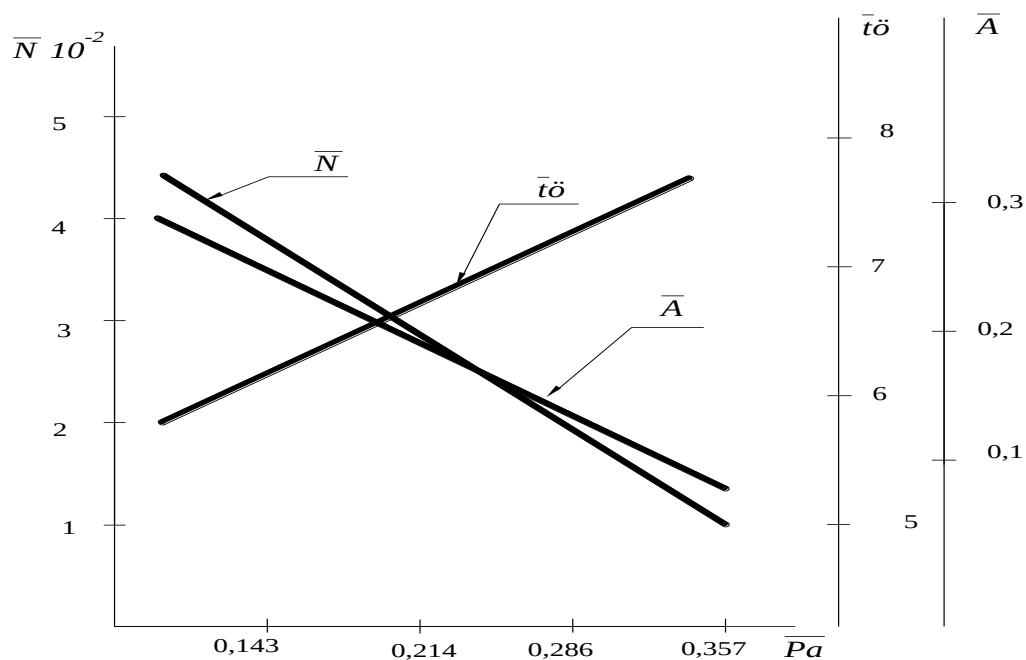


Рис. 4. Зависимость динамических параметров от величин противодавления для механизма с одной управляемой камерой:

$\bar{N}$ – ударная мощность, $\bar{A}$ – энергия удара, $\bar{t}_0$ – время рабочего цикла

Как видно из рис. 4 ударная мощность механизма с одной управляемой камерой, при увеличении противодавления в 2,5 раза, уменьшается более чем в 2,6 раза. Полученные результаты математического моделирования подтвер-

ждаются данными экспериментальных исследований пневмопробойника Ип 4603, приведенными в работе [6].

Таким образом, потеря мощности при увеличении противодавления в пневмоударном механизме с одной управляемой камерой происходит существенно интенсивнее, чем в механизме с двумя управляемыми камерами. Следует отметить, что частота ударов при этом уменьшается незначительно. Потеря ударной мощности происходит преимущественно за счет уменьшения энергии ударов.

Как было отмечено выше, при выборе принципиальной схемы машины необходимо учитывать факторы, определяющие надежность работы в специфических условиях горизонтального бурения. В бесклапанных пневмоударных механизмах, работающих в горизонтальном положении, ударник перед запуском может находиться в таком промежуточном положении, когда он перекрывает воздухораспределительные отверстия. Запуск механизма при этом существенно затрудняется. В таких случаях механизмы с одной управляемой камерой запускаются более надежно, поскольку имеют рабочую камеру, постоянно сообщенную с воздушной магистралью. За счет этого при подаче сжатого воздуха ударник перемещается в крайнее положение, независимо от исходного. По критерию надежности запуска механизмы с одной управляемой камерой являются предпочтительными.

Важным фактором, который необходимо учитывать при создании пневмоударного механизма, является расход воздуха. Следовательно, для полноты анализа необходимо проведение дополнительных исследований динамики рабочего цикла механизма с одной управляемой камерой. Кроме того, аналогичные исследования необходимо провести и для пневмоударных механизмов с одной управляемой камерой и эластичным клапаном, поскольку практический опыт показывает, что они надежно запускаются при большой длине питающей магистрали, при пониженном давлении, и прочих неблагоприятных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht. Hardrock Tunnel Boring Machines.
2. Сметные нормы и расценки на новые технологии в строительстве. Часть IV. Под общей редакцией Горячкина П.В.
3. Данилов Б.Б. Пути совершенствования технологий и технических средств для бестраншейной прокладки коммуникаций // ФТПРПИ. – 2007 – № 2. С. 69 - 75.
4. Данилов Б.Б. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу. Дис. докт. техн. наук / Новосибирск, 1997. – 249с.
5. Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н., Мюнцер Е.Г. Некоторые результаты исследования противодавления в выхлопном тракте погружного геолого-разведочного пневмоударника на его энергетические параметры // ФТПРПИ – 1985. -№ 6.
6. Ткач Х. Б. О работе пневматического поршневого привода с выхлопом в среду с давлением большим атмосферного // ФТПРПИ. – 1996 – № 6. С. 63-71.

© Б. Б. Данилов, Д. А. Воротников, 2014

ОБ ЭФФЕКТЕ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТРУДНООБОГАТИМОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

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)217-02-80, e-mail: benevikt@misd.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований по интенсификации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья путем использования энергетических воздействий. Показаны роль и особенности электрохимических и радиационных воздействий. Установлено, что обработка ускоренными электронами разупрочняет минеральное сырье, изменяет его флотационные свойства, а при наличии железосодержащих сульфидов – усиливает магнитные свойства. Прирост извлечения металлов достигает 27%, производительность процесса увеличивается в 2.2 раза.

Ключевые слова: минеральное сырье, энергетические воздействия, рудоподготовка, обогащение, технологическая и экономическая эффективность.

STIMULATING ENERGY EFFECT ON THE REBELLIOUS MINERAL PROCESSING

Victor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Leading Researcher, Mineral Beneficiation and Process Ecology Laboratory, tel. (383)217-02-80, e-mail: benevikt@misd.nsc.ru

The author describes experimental research findings on stimulation of ore preparation and concentration by energy treatment. The role and features of electrochemical and radiation treatment are shown. It is found that accelerated electron treatment softens mineral raw material, alters its flotation capacity and, if the mineral contains iron sulfides, amplifies its magnetic properties. The metal recovery growth reaches 27%, the processing efficiency increases 2.2 times.

Key words: mineral raw material, energy treatment, ore preparation, beneficiation, processing and economic efficiency.

Минерально-сырьевой сектор России обеспечивает более 30% внутреннего валового продукта и около 70% валютных поступлений в бюджет страны. Эти данные убедительно подтверждают, что экономическое благополучие страны в значительной степени зависит от состояния и эффективности использования минерально-сырьевой базы.

В настоящее время в переработку вовлекаются труднообогатимые руды сложного вещественного состава, характеризующиеся низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью и близкими свойствами минералов. Степень извлечения ценных компонентов при обогащении таких руд не

превышает 50%. При этом, как известно, 35-40% потерь связано со сротками и 30-35% – с тонкими частицами размером менее 40 мкм. Потери, вероятно, в будущем возрастут вследствие увеличения добычи низкокачественных руд.

В этих условиях создание высокоэффективных, экологически безопасных технологий приобретает первостепенное значение. Следует отметить, что выдающийся российский ученый, член-корреспондент АН СССР И.Н. Плаксин считал, что одним из важнейших направлений при обогащении минерального сырья является поиск таких энергетических воздействий, которые существенно повысят полноту и комплексность использования минерального сырья. Он одним из первых обосновал эффективность использования внешних воздействий в процессах обогащения полезных ископаемых [1].

Подготовка рудного сырья, включающая его измельчение и вскрытие тонковкрапленных минеральных комплексов, имеет первостепенное значение для достижения максимально высокого извлечения металлов из труднообогащаемого минерального сырья. В ряде работ [2–4] показана перспективность использования нетрадиционных немеханических способов подготовки минерального сырья для селективной его дезинтеграции по межфазным границам за счет образования микротрещин и каналов пробоя в результате энергетических воздействий при электрохимической, СВЧ-, электроимпульсной, электрогидродинамической, электроплазменной, магнитно-импульсной обработке, при воздействии потоком ускоренных электронов, сверхмощными гиперударными волнами, мощными наносекундными электромагнитными импульсами.

В настоящей работе приведены результаты выполненных автором в ИГД СО РАН исследований по развитию научных основ использования энергетических воздействий – электрохимических и радиационных – в процессах обогащения минерального сырья. Достоинством рассмотренных воздействий является наличие стандартного оборудования и комплектующих для реализации, при этом не требуется значительно изменять технологические схемы и оборудование обогатительных фабрик.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Электрохимическая обработка (ЭХО) – это способ эффективного воздействия на водные и гетерогенные системы электрическим током, позволяющий направленно регулировать физико-химические свойства поверхности минералов, химическое состояние реагентов, а также ионный состав природных и технических вод, в том числе жидкой фазы пульпы. Одним из примеров реализации ЭХО является создание и реализация под руководством академика РАН В.А. Чантурия электрохимической технологии водоподготовки в операциях пенной и липкостной сепарации обогащения алмазосодержащих кимберлитов в АК «АЛРОСА», что позволило существенно повысить извлечение алмазов.

В ИГД СО РАН также изучалась роль электрохимических воздействий для направленного изменения свойств минералов в гетерогенных системах применительно к процессам обогащения различного минерального сырья, а также к

процессам очистки природных и сточных вод от тонкодисперсных примесей и солей жесткости. На рис. 1 показаны основные направления исследований и возможного использования электрохимических воздействий.



Рис. 1. Области применения электрохимических воздействий

Установлено, что с использованием ЭХО можно не только изменять pH и окислительно-восстановительный потенциал пульпы, но и получать высокоактивные оксигидраты металлов. В работе [5], показано, что полученный с использованием ЭХО оксигидрат железа характеризуется высокой степенью дисперсности, дефектностью структуры, высокой интенсивностью движения атомов и другими факторами, являющимися причиной их повышенной активности. Особенности оксигидратов железа послужили основой интенсификации целого ряда технологических процессов, в том числе процесса седиментации. За счет активной коагуляции в десятки раз увеличивается скорость осаждения твердой фазы и существенно возрастает эффективность процесса сгущения, в результате уменьшаются потери ценных компонентов со сливами сгустителей [6]. Особенности электрохимически полученных оксигидратов цинка (рис. 2) изучены в ряде работ [7, 8].

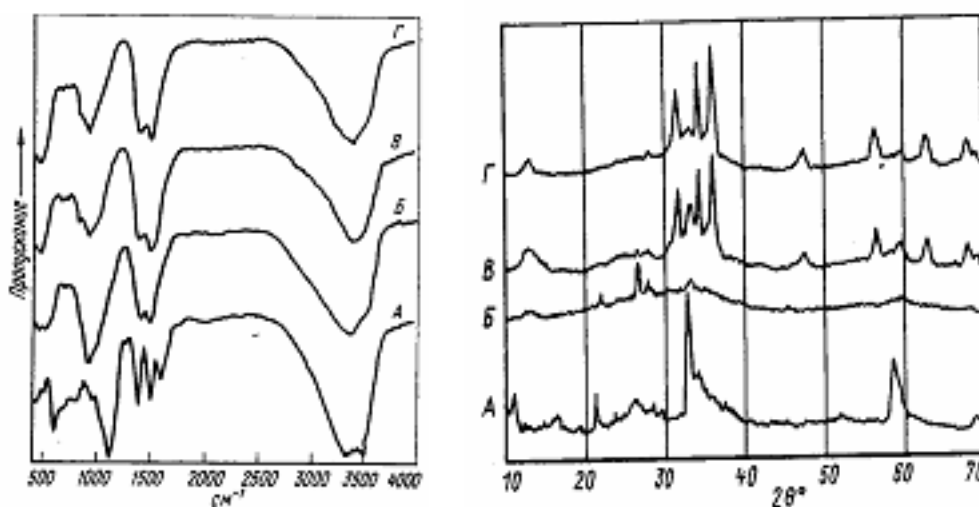


Рис. 2. ИК-спектры (слева) и рентгенограммы (справа) оксигидратов цинка, полученных химическим способом (А) и электрохимическим (Б, В, Г) при плотностях тока 0.3; 0.7 и 1 А/дм²

В [9-10] показано, что использование электрохимически полученных оксигидратов цинка при переработки полиметаллических руд позволяет не только отказаться частично или полностью от использования раствора сульфата цинка – экологический аспект, но и получить технологические преимущества, заключающиеся в интенсификации флотационного процесса с одновременным улучшением качества медно-свинцового концентрата и повышением извлечения цинка (до 4.7%) в конечный цинковый концентрат.

ВОЗДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

В ряде работ [11-14], в том числе и автором показано, что предварительная – перед измельчением – обработка руд или продуктов их обогащения высокоэнергетическими электронами является эффективным средством направленного изменения механических и физико-химических свойств минералов и руд. Впервые обнаружены явления существенной активации физико-химических процессов на поверхности и в объеме минералов и руд под действием ускоренных электронов, приводящие к разупрочнению минерального сырья, изменению его флотационных свойств, а при наличии железосодержащих сульфидов – к усилению магнитных свойств [12].

Важными являются установленные возможности разупрочнения руд и минералов и сокращение в 2 и более раза времени измельчения до заданной крупности с одновременным повышением селективности раскрытия сростков и связанным с этим приростом извлечения в концентрат до 20% и более теряемых ранее полезных минералов (таблица).

Таблица

Результаты исследований по интенсификации процессов
рудоподготовки и обогащения руд ускоренными электронами

Тип руды	Доза, кГр	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Увеличение производительности измельчения, % отн.	Прирост извлечения металлов, %
Оловосодержащая	2.0	0.56	не определяли	5 – 7
Железная	4.0	1.12	130 – 220	2.5 – 4
Медно-цинковая	2.0	0.56	15 – 20	5 – 10
Полиметаллическая	4.0	1.12	не определяли	13 – 16
Свинцово-цинковая	4.0	1.12	150 – 200	17 – 20
Медно-никелевая	4.0	1.12	–	20 – 27

Таким образом, в работе показана технологическая эффективность применения энергетических воздействий (электрохимических и обработки потоком ускоренных электронов) в процессах обогащения полезных ископаемых. Выполненными технико-экономическими расчетами [14-15] установлено, что технологии на основе указанных энергетических воздействий экономически выгодны, так как выполняются основные условия их эффективности: чистый дисконтированный доход (ЧДД) > 0 , индекс доходности (ИД) > 1 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш., Чантурия В. А., Якушкин В. П. О влиянии ионизирующих излучений на флотационные свойства некоторых минералов / И. Н. Плаксин Обогащение полезных ископаемых. Избранные труды. – М.: Наука, 1970. – С. 292–300.
2. Чантурия В.А., Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Бунин И.Ж. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 216 с.
3. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. – 2007. – № 3. – С. 107–128.
4. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные энергетические методы селективной дезинтеграции тонкодисперсных минеральных комплексов благородных металлов / Новые технологии в науке о Земле и горном деле. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2012. – С. 143–148.
5. Бочкарев Г.Р., Лебедев В.Ф., Ногин Н.М. О некоторых структурных особенностях оксигидрата железа, полученного электрохимическим путем // ФТПРПИ. – 1977. – № 1.
6. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И. Интенсификация процессов обогащения минерального сырья с использованием электрохимических воздействий /IX Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения». Чита.- 29-30 ноября 2009 г.
7. Ростовцев В.И. Электрохимические воздействия и их роль при обогащении труднообогатимого минерального сырья / VII Конгресс обогатителей стран СНГ [Электронный ресурс] – М.: МИСиС, 2009. Гидрометаллургические процессы.
8. Патент РФ № 2349389. Способ флотационного разделения коллективного сульфидного цинксодержащего концентрата (варианты) / Кондратьев С.А., Ростовцев В.И. – БИМП. – М., 2009. – № 8 (III ч).
9. Ростовцев В.И. Теоретические и практические основы использования энергетических воздействий в процессах горнообогатительного производства. / Материалы 7-ой международной научно-практической конференции Прогрессивные технологии и оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. – Новосибирск: Сибпринт, 2010. – С. 123–134.
10. Бочкарев Г.Р., Ростовцев В.И., Потапов Г.П., Белоусов Ю.В., Даниленко А.А., Буренко З.М. Интенсификация процесса флотации полиметаллической руды // Цветная металлургия. — 1988. — № 1. — С. 6–8.
11. 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.
12. Кондратьев С.А., Бочкарев Г. Р., Ростовцев В.И. Интенсификация процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья с использованием радиационных энергетических воздействий. VIII Всероссийская научно-практическая конференция «КУЛАГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ». 27-28 ноября 2008 г. г. Чита.
13. Bochkarev G.R., et. al. Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing // Proceedinds of the XX International Mineral Processing

Congress: 21-26 September 1997, Aachen, Germany / Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol.1, pp.231-243.

14. Ростовцев В.И. Научное обоснование и разработка интенсифицирующих методов энергетических воздействий на твердую и жидкую фазы труднообогатимого минерального сырья: авторефер. дис. ... д-ра техн. наук. – Чита. – 2012. – 40 с.

15. Ростовцев В.И. О технологической и экономической эффективности использования немеханических энергетических воздействий при переработке труднообогатимого минерального сырья // ФТПРПИ. – 2013. – № 4. – С. 145–155.

© В. И. Ростовцев, 2014

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРУШЕНИЙ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

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)217-06-07, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Иван Александрович Рыженков

Главное управление МЧС России по Новосибирской области, 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 4а, тел. (383)223-75-78, e-mail: mchs@nco.ru

Валентина Ивановна Щелканова

Таштагольский горный техникум, Россия, г. Таштагол, ул. Пospelова, 117, кв. 6, заместитель директора по научной работе, тел. (838 473)3-04-77

Виктор Андреевич Шаповалов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630105, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, соискатель, тел. (383)225-85-36

Рассмотрены способы защиты шахтеров от обрушений горных пород в призабойной зоне горизонтальных горных выработок и способ прогнозирования обрушений и заколообразований на основе непрерывной или периодической регистрации электромагнитного излучения горных пород приконтурной зоны горной выработки.

Ключевые слова: горная выработка, прогнозирование обрушений горных пород, электромагнитное излучение, приконтурная зона.

PREDICTION OF CAVE-INS IN THE DEVELOPMENT HEADING FACE

Gennady I. Kulakov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Principal Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)217-06-07, e-mail: misd.@nsc.ru

Ivan A. Ryzhenkov

Bureau of RF Ministry of Emergencies in Novosibirsk Region, 630091, Russia, Novosibirsk, 4 Sovetskaya St., tel. (383)223-75-78, e-mail: mchs@nco.ru

Valentina I. Shchelkanova

Tashtagol Technical School on Mining, Russia, Tashtagol, Kemerovo Region, 117 Pospelova St., Deputy Director for Science

Victor A. Shapovalov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Fellow applicant, tel. (383)225-85-36

In focus are the methods of mine personnel protection from cave-ins in face zones of drifts and the approach to prediction of cave-ins and overhangs based on continuous or periodic recording of electromagnetic emission in wall rocks.

Key words: drift, rock cave-in prediction, electromagnetic emission, wall rocks.

При проведении подземных горных выработок на горных предприятиях обычно широко используется метод взрывной отбойки горных пород. В забое проходимой выработки бурятся, согласно проекта, шпуры, в которых размещаются патроны взрывчатого вещества. Разрушенная взрывом горная порода грузится в вагонетки и транспортируется в отвалы. Погрузка обычно осуществляется специальными погрузочными машинами. После удаления раздробленной породы на участке выработки, где удалили отбитую породу (уголь и т.п.), возводится временная переносная крепь, которая защищает участок выработки еще не закрепленный постоянной крепью от случайных обрушений. Временную крепь образуют следующим образом: на постоянную крепь подвешивают вдоль боковых стенок выработки две металлические трубы длиной 4-5м, продвигают трубы вплотную к забою и настилают на них полук из обрезков плах.

В качестве постоянной крепи используют различные материалы: деревянная крепь, металлическая крепь, бетонная крепь, железобетонная крепь.

На рисунке приведена схема проведения горизонтальной горной выработки трапециевидного поперечного сечения. На разрезе Б-Б приведено вертикальное продольное сечение горной выработки. На правом участке (участок «а») : забой рассматриваемой выработки, из которого удалена отбитая горная масса. Участок «б» : часть выработки, в пределах которого установлена постоянная крепь. На верхнем рисунке приведены поперечные вертикальные сечения А-А и А₁- А₁. На нижнем рисунке приведен общий вид деревянной крепи : трапециевидной рамы, состоящей из двух стоек 6 и верхняка 7. боковые стенки и крепь ограждены затяжками 8 (отрезками деревянных плах или железобетонной плиты длиной 1,0-1,2 м (в практике горного дела это затяжки).

На незакрепленном участке выработки (участок «а» на рисунке) цифрой 5 обозначены заколы породы на плоскости забоя, на боковых стенках и на кровле выработки. Такие заколы пород могут обрушаться и травмировать шахтеров, ведущих работы. Одно из назначений временной крепи : исключить возможность падения таких кусков породы.

Однако после взрывания породы в забое, выработка (участок «а») не имеет крепи и здесь практически всегда образуются заколы и нависание кусков породы, обрушаясь они могут травмировать работающих. Для предохранения рабочих на участке, где крепь еще отсутствует, обычно устраивают временную крепь. Обычно это две трубы длиной 4-5 м, подвешенные на участке, где крепь уже имеется (например, участок «в»).

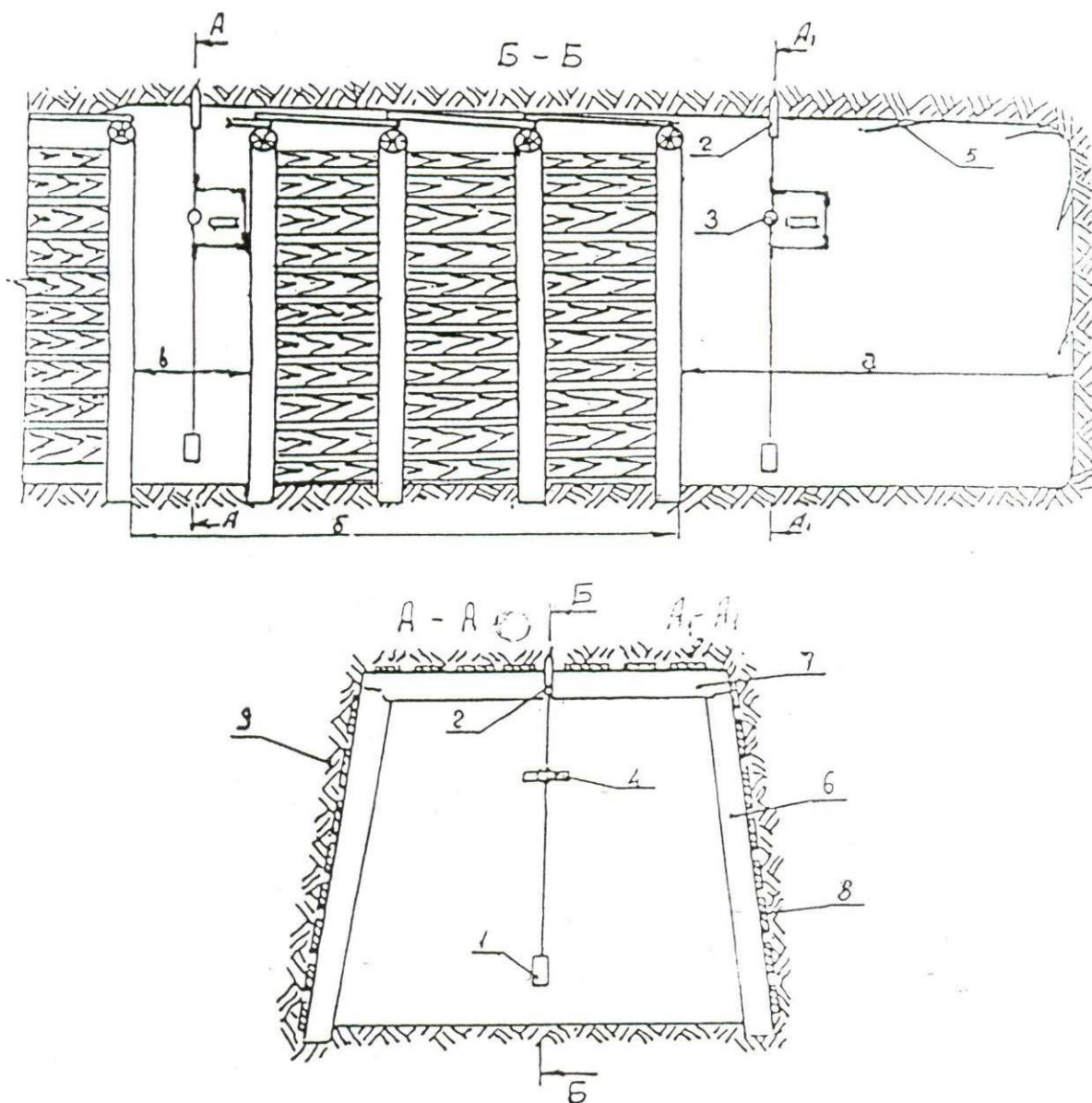


Рис. Подготовительная горная выработка и устройство для прогноза заколов и обрушений:

- 1 - отвес, 2 - анкер, 3 - подвижный фиксатор, 4 - регистрирующее устройство,
 5 - заколы на кровле, забое горной выработки, 6 - стойки крепи,
 7 - верхняк крепежной рамы, 8 - затяжки, 9 - порода

Такие трубы после взрывной отбойки продвигают вперед до забоя и на них укладывают затяжки, что предохраняет рабочих от травмирования случайно упавшими кусками породы [1].

Такой способ временной крепи используется на шахтах Кузбасса. Однако рассматриваемая конструкция имеет ряд существенных недостатков. Несмотря на её конструктивную простоту такая временная крепь при её возведении трудоемка. Необходимо при каждом продвижении забоя выработки передвигать вперед упомянутые трубы. На них настиляется полук из затяжек или обрезков

плах, досок. После окончания бурения шпуров и их заряжения зарядом взрывчатки, полук приходится разбирать. Затем после окончания взрывных работ, полук необходимо снова собирать.

Проблему можно было бы существенно упростить, если бы каким либо способом узнать, какой участок в пределах призабойной незакрепленной части выработки может обрушиться. Шахтеры обычно по звукам из массива пород оценивают наличие таких участков и, используя ломик или длинную штангу, на таких ослабленных участках производят оборку (оборка обнаженных породных стенок выработки, ПБ п. 149 [2]).

В лаборатории механики горных пород ИГД СО РАН разрабатывается метод прогноза заколов и вывалообразований горных выработках с использованием электромагнитного излучения деформируемых горных пород [3,4].

Метод основан на использовании разработанных (с участием специалистов НГТУ) приборов типа РЭМИ-2 и ИЭМИ-1; приборы малогабаритны: 140 x 70 x 25 мм, масса 250г.

Разработаны два варианта прогнозирования обрушений с упомянутыми приборами: прибор находится в кармане спецовки одного из рабочих или подвешен на крепи.

Принцип работы приборов. Горные породы разрушаются за счет формирования трещин и микротрещин. В процессе возрастания напряжений в каком-либо участке массива пород начинают формироваться микротрещины, последние при возрастании напряжений прорастают и объединяются, формируя трещины. При дальнейшем возрастании напряжений трещины объединяются, постепенно формируя трещины больших размеров. В горных породах всегда имеются свободные электроны, реже заряженные ионы. Электроны, оказавшиеся вблизи поверхности микротрещины, при некоторой скорости их движения могут преодолеть потенциальный барьер и вылететь в пространство трещины или микротрещины. В процессе деформирования породы стенки трещин и микротрещин перемещаются в пространстве, вместе с ними перемещаются электроны и заряженные ионы. В соответствии с законами физики, движущиеся в пространстве заряженные частицы излучают электромагнитные волны (в частном случае, это радиоволны). Электромагнитные волны обычно регистрируют с помощью антенн, магнитных (виток изолированного проводника) или емкостных (типа конденсатора). Электромагнитная волна, проходя через антенну, наводит в ней ток, движущиеся заряды создают электромагнитное поле.

Указанные выше приборы снабжены цифровыми индикаторами и сигнализатором, звуковым и световым.

Приборы ИЭМИ-1 или РЭМИ-2 позволяют регистрировать опасность обрушения. В этом случае опасность обрушений будет определяться по звуковому сигналу прибора либо по интенсивности регистрируемого электромагнитного излучения. Прибор будет находиться у проходчиков, работающих в упомянутом забое. Прибор может находиться либо в нагрудном кармане одного из рабочих, либо подвешен на крепи выработки. Рабочие, пришедшие в забой в начале смены, смогут с помощью упомянутого прибора оценить наличие воз-

можных участков обрушения и произвести оборку таких участков. При этом упомянутый контроль можно осуществлять в процессе смены, например, перед выполнением работ по бурению шпуров, после выполнения взрывных работ по возведению крепи. Метод опробован в условиях Таштагольского рудника [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров В.М., Котов Г.Н., Зубань В.А. Применение временных крепей в забоях подготовительных выработок шахт Кузбасса // Вопросы безопасности в угольных шахтах. Труды ВостНИИ, т. IX, Изд-во «Недра», М., 1969. – С. 244-253.
2. Правила безопасности в угольных шахтах. ПБ 05-018-03. Выпуск 11. Серия 5 Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности. Изд-во ФГУП «Промышленная безопасность», М., 2005.
3. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критического состояния горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2009. – 314 с.
4. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
5. Ваганова В.А., Шипеев О.В. Региональные методы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород, используемые при отработке Таштагольского месторождения // Сб. докл. науч.-прак. конф. по горным ударам «Оценка современных достижений в области безопасной отработки удароопасных месторождений, методы прогноза и предупреждения горных ударов». – Таштагол, 2000. – С. 12-23.

© Г. И. Кулаков, И. А. Рыженков, В. И. Щелканова, В. А. Шаповалов, 2014

О ПЕРЕХОДЕ СЕЙСМОВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ ОТ СКАЛЬНЫХ ПОРОД В ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЛ

Владимир Федорович Юшкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных средах, тел. (383)217-07-16, e-mail: L14@ngs.ru

Рассматриваются особенности перехода сейсмовзрывной волны со свободной поверхности скальных пород в осадочный чехол борта карьера при добыче известняков. Анализируется трансформация кинематических и спектральных параметров волны при распространении в разнотипных грунтах и вариации связанных с этим процессов деформирования осадочного чехла.

Ключевые слова: скальный массив, осадочный грунт, сейсмостанция, спектр волны.

TRANSITION OF SEISMIC BLAST WAVE FROM SOLID ROCKS TO SEDIMENTARY MANTLE

Vladimir F. Yushkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Modeling Nonlinear Geomechanical Processes in Blocky Media, tel. (383)217-07-16, e-mail: L14@ngs.ru

The author examines the features of seismic blast wave transition from the free surface in solid rocks to the sedimentary mantle in limestone opencast mining. The transformation of the kinetic and spectral parameters of the wave propagating in different type soil and the varied related deformation of the sedimentary mantle are analyzed.

Key words: hard rock mass, sedimentary cover, seismic station, wave spectrum.

Технологические взрывы при добыче твердых полезных ископаемых в карьере способны влиять на устойчивость его бортов и оказывать в результате формирования сейсмовзрывных волн техногенные воздействия на объекты технической инфраструктуры горнодобывающего предприятия, поэтому обеспечение геомеханической безопасности ведения горных работ при заданных технологических условиях добычи остается одной из основных задач эффективного освоения месторождения. Причинами существенного действия сейсмовзрывной волны при распространении по борту карьера могут быть особенности структурного строения горных пород, обусловленные системами трещин и разломов вблизи очага взрыва, а также наличием осадочных грунтов, что усложняет механизм процесса. Правильное понимание особенностей прохождения волн на сопряжениях осадочных грунтов и скальных пород с учетом их структуры поможет продвинуться в решении этой задачи.

Для оценки влияния сейсмовзрывной волны от технологического взрыва были изучены параметры ее распространения по откосу осадочных грунтов борта карьера месторождения известняков в районе г. Искитим (см. план на рис. 1а) Новосибирской обл. Известняки по внешнему виду массивные, крепкие, мелкозернистые, с неровным изломом, окраска изменчива – от темно-серой до светло-серой, почти белой, в северо-западной части месторождения мраморизованы, расположены под слоем осадочных пород, представленных в основном суглинками с примесью глины [1, 2].

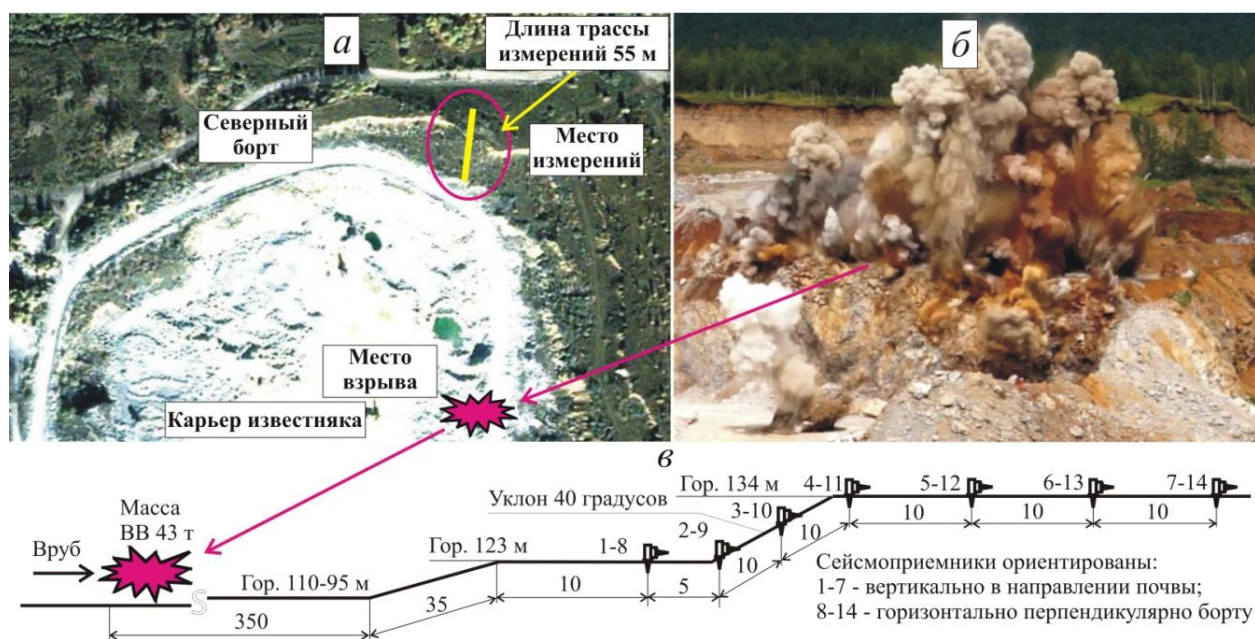


Рис. 1. План участка Искитимского карьера известняков с указанием места проведения массового взрыва (а), внешний вид взрыва (б) и схема измерений волны взрыва с расстановкой сейсмоприемников по откосу и верхнему уступу борта карьера (в). ВВ – взрывчатое вещество

Вскрышные горизонты расположены на отметках + 125, 130 м, добычные – на отметках + 125, 110, 95, 80, 65, 40 и 25 м. Продуктивная толща сложена однородными по физико-механическим свойствам известняками с крутым моноклиновым падением, имеющим различную степень закарстованности: до глубины 6 м – 14,8 %, ниже – 5 %. Присутствуют граниты блочные. Кровля продуктивной толщи имеет неровную поверхность с карстовыми воронками и западинами. Карсты заполнены глиной с разновидностями суглинков. На верхних горизонтах известняки среднетрещиноватые и среднекрупноблочные. Нижние горизонты известняка малотрещиноватые, крупноблочные.

Для получения новой информации о динамико-кинематических параметрах распространения волны массового взрыва и оценки влияния особенности работы групп скважинных зарядов ВВ вблизи свободной поверхности горных пород на формирование сейсмовзрывной волны в массиве выбран уступ борта

карьера на отметках гор. +123– +134 м (см. рис. 1а, б), где нижний горизонт – блочные граниты, выше расположены осадочные грунты (суглинки).

Запись сейсмической волны взрыва выполнялась широкополосной сейсмостанцией «Лакколит 24-М» [3] с использованием сейсмоприемников GS20-DX (см. рис. 1в), установленных попарно в грунт с интервалом 10 м с ориентацией оси чувствительности сейсмоприемников 1–7 вертикально к почве и оси чувствительности сейсмоприемников 8–14 горизонтально перпендикулярно борту для каждой пары. Пара сейсмоприемников 1, 8 была закреплена в скальном массиве. Длина измерительной трассы сейсмоприемников составляла 55 м. Принятая ориентация сейсмоприемников позволила зарегистрировать вертикальную и горизонтальную компоненту сейсмической волны массового взрыва, который был произведен на расстоянии ~ 400 м от борта карьера.

Регистрация волны взрыва осуществлялась в режиме «По обнаружению». Этот режим обеспечивает включение сейсмостанции на запись при наступлении сейсмического события, амплитуда сигнала которого превышает заданное пороговое значение срабатывания запускающего сейсмоприемника. При записи волны взрыва коэффициент усиления по каналам измерений был принят равным 1, время задержки сигнала на запись установлено 8 мс. Частота дискретизации выбрана 500 Гц как оптимальная по длительности записи волны взрыва.

Массовый взрыв производился в вертикально расположенных рядами скважин согласно схеме буровзрывных работ, где заряды 107 скважин, объединенных в 15 групп, были инициированы с интервалами замедления 25 мс в каждой группе. Инициирование взрывания скважин каждой из групп обеспечивается с помощью поверхностных детонаторов неэлектрической системы инициирования (НСИ), имеющих номинальное время замедления 25 мс, и внутрискважинных детонаторов, имеющих номинальное время замедления 500 мс.

При взрыве заряда ВВ в массиве волна давления формирует зону дробления вблизи взрывааемых скважин, где происходит разрушение горных пород. По мере ослабления волны давления разрушение пород в массиве прекращается и формируется объемная упругая волна. Если исходить из минимально возможного времени существования волны давления – времени разложения ВВ (~14-метрового цилиндрического заряда эмулата), это время составит ~ 3 мс. За это время фронт волны распространится на расстояние до 12 м. С увеличением расстояния в массиве действие волны может изменяться под влиянием отраженных волн от поверхностей, существующих в структурах массива.

На рис. 2 показан запись скорости смещений пород при действии сейсмозрывной волны, зарегистрированной сейсмостанцией «Лакколит» по каналу 1 на удалении 400 м от места взрыва (см. рис. 1в). По ординате на записи указана амплитуда вертикальной скорости смещений пород в мм/с, по абсциссе – время t в мс от момента запуска сейсмостанции на запись сигнала. Зная номинальные интервалы замедления, на записи можно выделить вступления волны взрыва зарядов практически от всех групп скважин, т. к. сейсмоприемник 1 находится в зоне прямого действия сейсмозрывных импульсов от взрывааемых скважин.

Как видно по сейсмограмме, на момент вступления колебаний от взрыва зарядов группы скважин последующего интервала замедления, скорость колебаний пород от взрыва зарядов предыдущего интервала не успевает снизиться до нуля, хотя и испытывает значительное затухание. Таким образом горный массив при взрывании с номинальным замедлением 25 мс не успевает успокоиться и сейсмовзрывная волна накладывается на волну давления от взрыва зарядов очередной группы скважин. Нижеприведенный частотный анализ выполнен по интервалам ступеней замедления для всего цуга записанных колебаний.

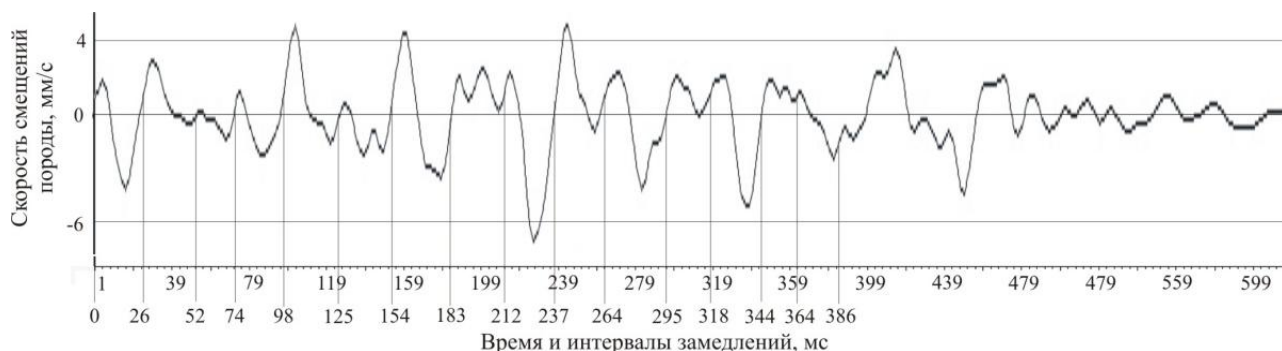


Рис. 2. Запись исходного сигнала волны взрыва сейсмоприемником 1 на удалении 400 м от места взрыва

На рис. 3 показано изменение частот максимальных значений спектральной плотности скорости смещений пород, выделенных на интервалах замедлений (см. рис. 2) при взрыве соответствующих групп скважин. На графике рис. 3а, построенном по записи сейсмоприемника 1 (см. рис. 1в), видно, что несущие частоты максимумов спектральной плотности, зарегистрированных по выделенным интервалам на скальных породах, изменяются в диапазоне от 24 до 38 Гц, при этом отмечены два отклонения до частот 90 и 48 Гц.

На графике рис. 3б, построенном по записи сейсмоприемника 3, установленном на осадочный грунт в центре склона борта карьера (см. рис. 1в) видно, что несущие частоты максимумов спектральной плотности изменяются в диапазоне от 13 до 35 Гц, при этом отмечены отклонения до частот 41 и 1 Гц. На графике рис. 3в, построенном по записи сейсмоприемника 4, установленном на осадочный грунт верхнего горизонта борта карьера (см. рис. 1в) видно, что несущие частоты максимумов спектральной плотности изменяются в диапазоне от 17 до 33 Гц, при этом отмечены отклонения до частот 41 и 1 Гц. Как следует из графиков на рис. 3а-в, переход сейсмовзрывной волны со скальных пород в осадочные грунты на удалении ~400 м от места взрыва, на частотах 13 и 19 Гц приводит к формированию маятниковой волны с кратностью 2 и корень из 2 по линейке частот выделенных максимумов пиков спектральной плотности.

По сейсмограмме исходных сигналов взрыва, зарегистрированной установленными по трассе сейсмоприемниками 1–14, согласно методике [4] были определены максимальные амплитуды вертикальной и горизонтальной компо-

нент смещений грунта (см. рис. 3г), остаточное смещение по трассе варьирует от 0.6 до 3.6 мкм. Максимальные смещения, определенные для положительной и отрицательной полуволн взрыва, показывают усиление амплитуды осадочных грунтов колебаний и знакопеременный характер реакции массива на динамическое воздействие взрыва.

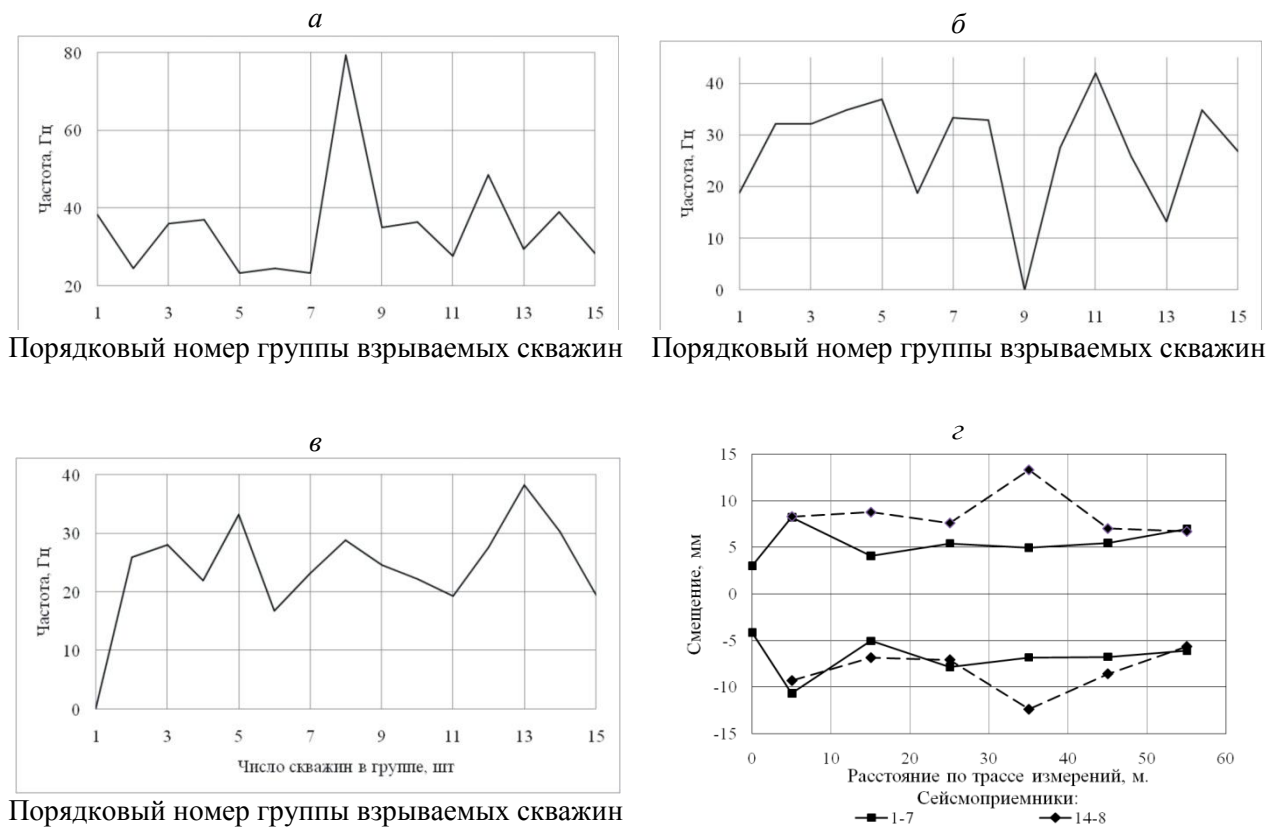


Рис. 3. Графики изменения частот максимальных значений спектральной плотности скорости смещений пород, выделенных при взрыве зарядов разных групп скважин по записям сейсмоприемников 1 (а), 3 (б) и 4 (в); амплитуды максимальных смещений грунта по трассе для положительной и отрицательной полуволны на сейсмограммах взрыва (г). Начало отсчета расстояний по осям координат принято от сейсмоприемников 1 и 8

Таким образом, анализ сейсмозрывной волны по интервалам замедлений показал, что каждая из групп взрываемых скважин возбуждает колебания, собственные частоты которых, характерные для скальных пород, при переходе волны в осадочные грунты, смещаются в низкочастотную область, что соответствует условиям формирования маятниковой волны в массиве, при этом максимальные смещения в грунтовом массиве усиливаются по амплитуде.

Автор выражает благодарность специалистам Искитимского карьера Пороховскому Н.Н., Кабанцу В.И., Михайлову М.В. за помощь в проведении эксперимента в карьере.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ОНЗЗ.1 РАН за 2013-2014 гг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В.Н., Середович В.А., Юшкин В.Ф., Иванов А.В., Прокопьева С.А. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. – 2007. – № 5.
2. Опарин В.Н., Багаев С.Н., Орлов В.А., Чугуй Ю.В., Юшкин В.Ф. и др. Методы и системы сейсмодиформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
3. Программа управления станцией сейсморазведочной инженерной цифровой «Лакколит 24-М» (модель 01). РО. – М.: ООО «Логис» (Раменское), 2005.
4. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: «Недра», 1981.

© В. Ф. Юшкин, 2014

ВЛИЯНИЕ ДЕПРЕССИОННО-СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА¹

Андрей Владимирович Савченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

Евгений Николаевич Чередников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)217-01-26

Михаил Николаевич Цупов

ООО «Шахта «Чертинская-Южная»», 652645, Россия, г. Белово, Кемеровская обл., 5-я рудничная, 90, горный мастер, тел. +79039427257, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Представлены результаты промысловых испытаний скважинного гидроударного генератора, расположенного на глубине залегания продуктивного пласта и применяемого для импульсного воздействия на призабойную зону скважины с целью улучшения ее фильтрационных свойств.

Ключевые слова: гидроударный генератор, сейсмический импульс, депрессионное воздействие.

DEPRESSION–SEISMIC EFFECT ON BOTTOM-HOLE FORMATION ZONE

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Pulse Systems, tel. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

Evgeny N. Cherednikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Pulse Systems, tel. (383)217-01-26

Mikhail N. Tsupov

Chertinskaya-Yuzhnaya Mine, 652845, Russia, Kemerovo Region, Belovo, 90 5th Rudnichnaya St., Overman, tel. +7903-942-72-57, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

The article presents the results of field tests of the downhole hydraulic impact generator placed at the formation occurrence depth for pulse excitation of the bottom-hole formation zone with the aim to improve its deliverability.

Key words: hydraulic impact generator, seismic impact, depression effect.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 14-05-31395-мол_a.

Применение скважинных гидроударных генераторов для сейсмического воздействия на продуктивные нефтяные пласты, с целью повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти, ведутся с 2003 года и показывают положительные результаты на нефтяных месторождениях России.

За полный цикл работы насос-пульсатора в скважине создаются знакопеременные импульсы давления (рис. 1). Информация об изменении давления на забое скважины получается косвенным методом, посредством применения эхолота, используемого для определения уровня и контроля за положением затрубной жидкости.

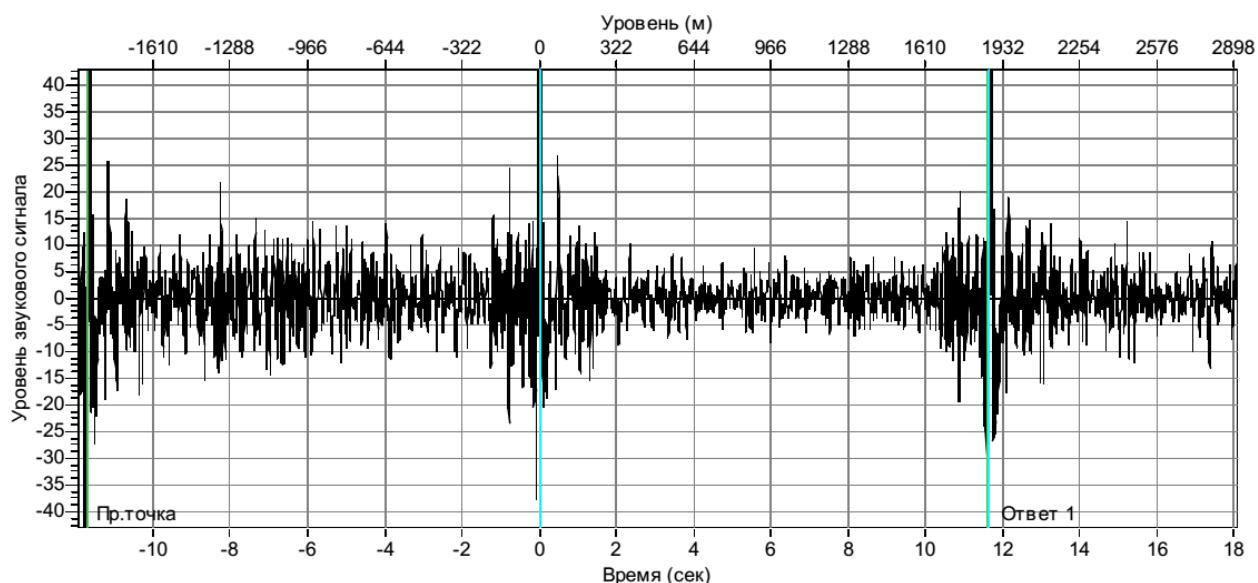


Рис. 1. Эхограмма работы устройства

Импульсы повышенного давления преобразуются через механические излучатели в сейсмические колебания.

Импульсы пониженного давления эффективно используются для выноса механических примесей и очистки призабойной зоны пласта, тем самым увеличивая приток к добывающей скважине. С этой целью, скважинный генератор размещается на глубине залегания продуктивного пласта и для достижения максимального депрессионного эффекта всасывающие окна находятся на уровне перфорации (рис. 2).

Явление имплозии или импульсной депрессии на призабойную зону удается реализовать с помощью данного устройства в момент сообщения импульсной камеры с затрубным пространством. В результате этого, в скважине происходит резкое падение давления жидкости и продолжается до тех пор, пока струя достигнет нижнего торца камеры, отразится, вследствие расширения струи и вновь вернется к верхнему краю камеры. Этот процесс регистрируется на устье скважины. На рис. 3 приведена эхограмма работы устройства и спектральный состав колебаний затрубной жидкости.

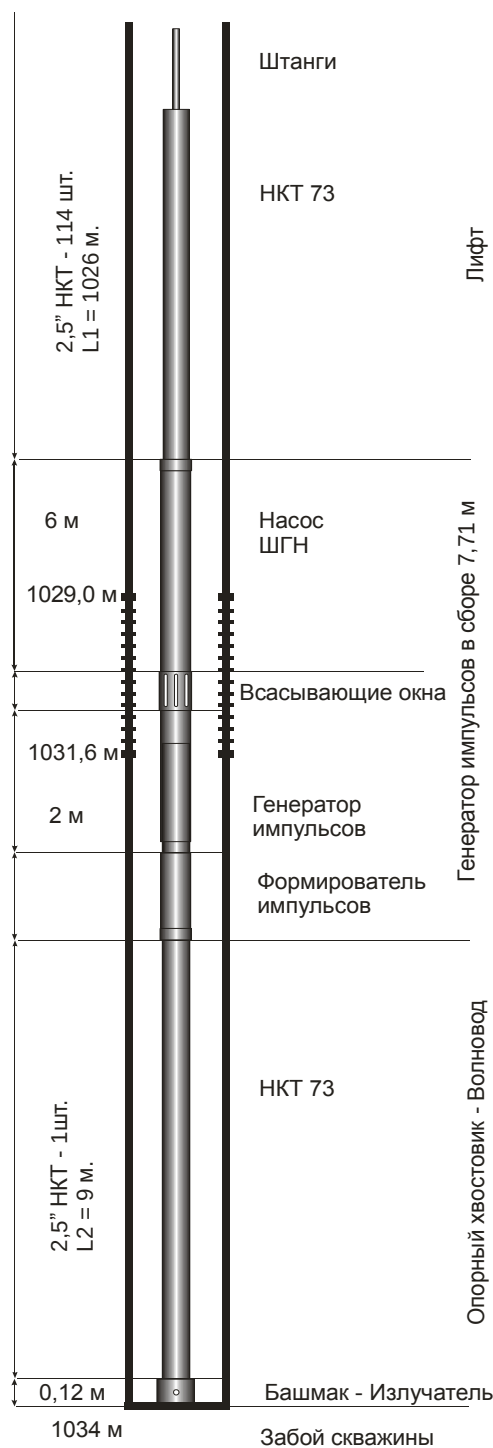


Рис. 2. Компоновка генератора в скважине для депрессионно-сейсмического воздействия

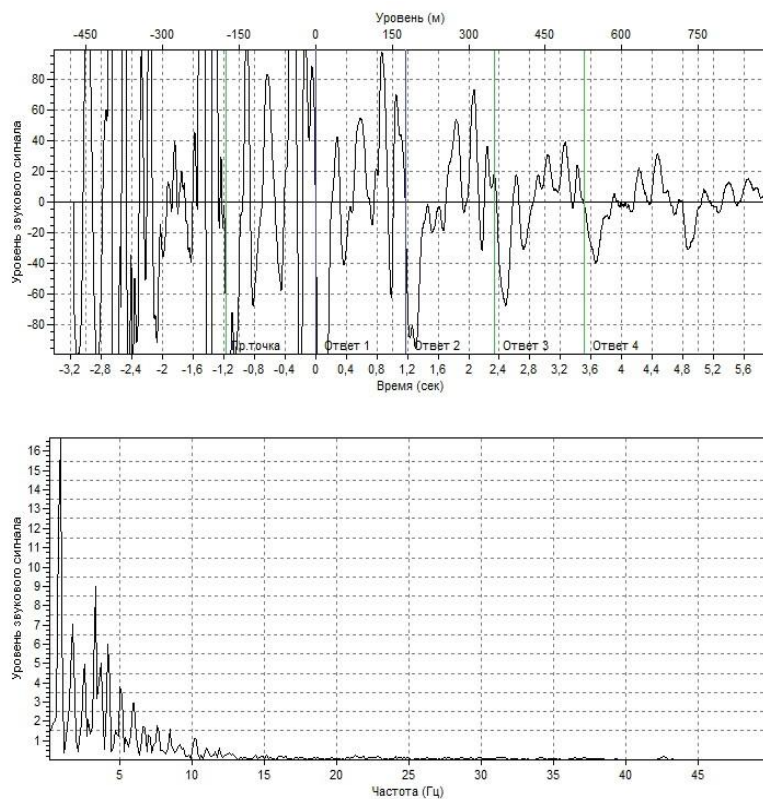


Рис. 3. Эхограмма работы устройства и спектральный состав колебаний затрубной жидкости

При помощи данной технологии в нефтяной компании ОАО «Татойлгаз» (г. Альметьевск) были проведены обработки призабойной зоны скважины источником (рис. 4), расположенным на глубине залегания продуктивного пласта.

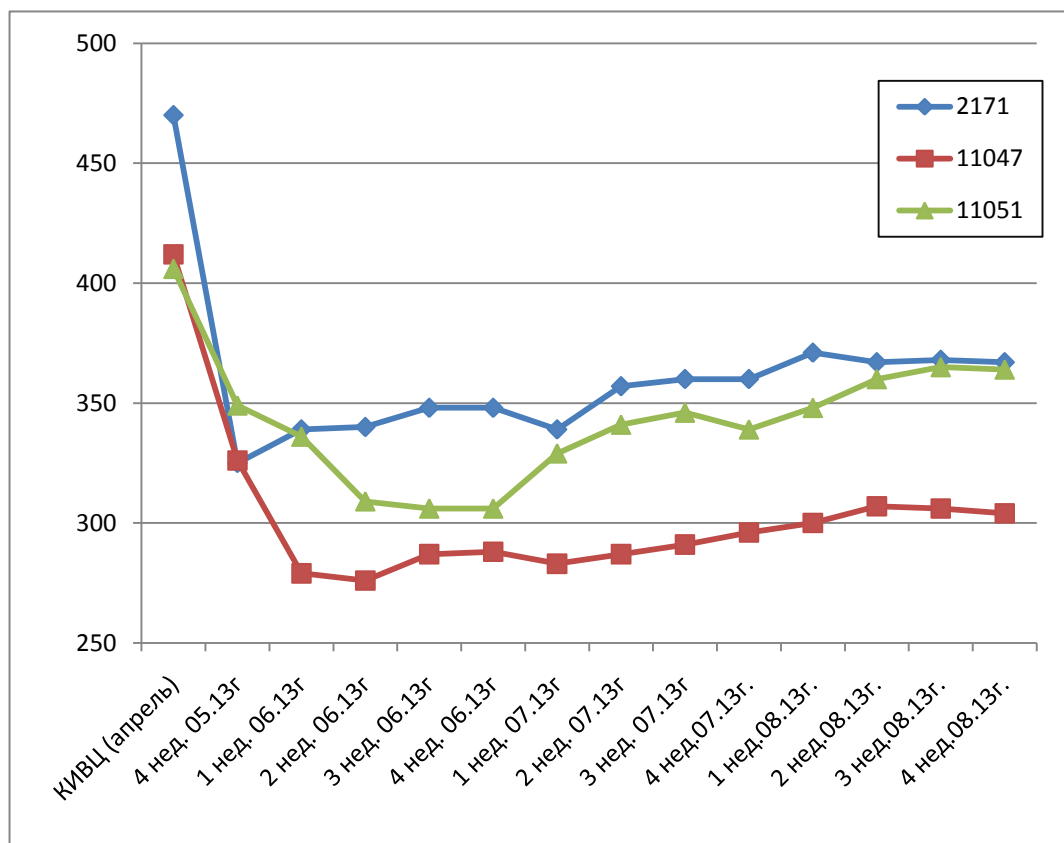


Рис. 4. Рост динамических уровней в скважинах при кратковременной импульсной депрессии на пласт

Результатом применения депрессионно-сейсмической технологии является рост динамических уровней по группе скважин, подтверждающих эффективность очистки призабойной зоны пласта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. №2490422 РФ, МПК E21B28/00 E21B43/25 Установка для импульсного воздействия на продуктивный пласт / Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Савченко А.В. - Опубл. 20.08.2013. - Бюл. № 23.

© А. В. Савченко, Е. Н. Чередников, М. Н. Цупов, 2014

О ВЛИЯНИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖСЛОЕВЫХ КОНТАКТОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Виктор Михайлович Серяков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики горных пород, тел. (383)217-01-52, e-mail: vser@misd.nsc.ru

С помощью математического моделирования выполнен расчет напряженно-деформированного состояния слоистого массива, формирующегося при отработке пласта полезного ископаемого. Для описания взаимодействия между слоями использована упруго-пластическая модель среды, отражающая основные особенности деформирования берегов контактов: расслоение, значительный сдвиг слоев вдоль плоскости напластования.

Ключевые слова: породный массив, напряжения, деформации, разрушение, межслоевые контакты, расслоение, пределы прочности, зоны обрушения.

EFFECT OF ELASTOPLASTIC DEFORMATION AT BEDDING INTERFACES ON STRESS STATE OF ENCLOSING ROCKS AROUND MINED-OUT VOID

Victor M. Seryakov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)217-01-52, e-mail: vser@misd.nsc.ru

By mathematical modeling, the author calculates stress-strain state in a bedded rock mass under mining. The description of interaction between beds uses elastoplastic model that describes features of deformation at the bedding interfaces: exfoliation and shearing of beds along the bedding plane.

Key words: rock mass, stress, strain, destruction, bedding interface, exfoliation, strength limits, cave-in zones.

Имеющийся опыт отработки запасов полезных ископаемых в различных регионах, физическое моделирование на эквивалентных материалах позволили установить характер разрушения подработанного массива и предложить аналитические выражения для определения сдвижений и оседаний точек земной поверхности над отработанным пространством [1]. Однако, в усложняющихся условиях отработки месторождений, при выемке пластов в нетипичной горно-геологической обстановке применение имеющихся методик требует дополнительного обоснования. Здесь определяющую роль играет математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород [2]. С его помощью можно сравнительно легко изменять условия отработки пластов полезных ископаемых, глубину ведения горных работ, размеры и количество различных выработок. Наибольшими возможностями в этом направле-

нии обладает метод конечных элементов [3,4]. Вместе с тем сложность процесса деформирования и разрушения массива горных пород над выработанным пространством, разнообразие математических моделей, описывающих нелинейные явления в сплошных средах и требующих определения большого числа физико-механических характеристик пород приводят к выводу, что для адекватного моделирования геомеханического состояния подработанной толщи необходимо установление и учет основных факторов, влияющих на рассматриваемый процесс.

Анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению закономерностей деформирования блочного массива, показал, что тектонические нарушения, поверхности напластования, контакты разномодульных горных пород требуют индивидуального включения их в геомеханическую модель рассматриваемой задачи. При математическом моделировании напряженно – деформированного состояния массива вполне обоснованно представлять эти нарушения сплошности элементами, имеющими нулевую толщину, и рассматривать их деформирование в двух направлениях: по нормали и вдоль плоскости нарушения [5].

На рис. 1 для соответствующих зависимостей напряжения – относительные смещения показаны схемы применения итерационных процедур методов начальных напряжений и начальных деформаций. Метод начальных напряжений применим для всей области τ_n от U (рис.1в). Его также можно использовать для удовлетворения зависимости σ_n от V при $V > 0$ (рис. 1а). При $V < V_0$ (V_0 – предел упругого деформирования контакта при сжатии) для кривой $\tau_n - V$ применим метод начальных деформаций (рис. 1б).

Условие равенства нулю напряжений в нарушении сплошности при отсутствии смещений берегов контакта друг относительно друга приводит к тому, что удовлетворить зависимости σ_n от V при $V > 0$ можно только с помощью метода начальных напряжений [6].

С использованием приведенных зависимостей были получены соотношения для определения векторов узловых сил [6], которые использованы при разработке алгоритмов и программ расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния слоистого массива. Моделирование деформирования межслоевых контактов осуществлялось путем однократного формирования матрицы жесткости расчетной системы, нелинейный характер зависимостей между взаимными смещениями берегов контактов и напряжениями проводился изменением правой части решаемой системы уравнений.

Схема слоистого массива горных пород, для которого было проведено математическое моделирование, приведена на рис. 2. Здесь показаны изолинии распределения второго главного напряжения. Упругопластическое деформирование берегов межслоевых контактов в подработанной толще пород вызывает рост величин растягивающих напряжений в слоях, расположенных непосредственно в окрестности выработанного пространства.

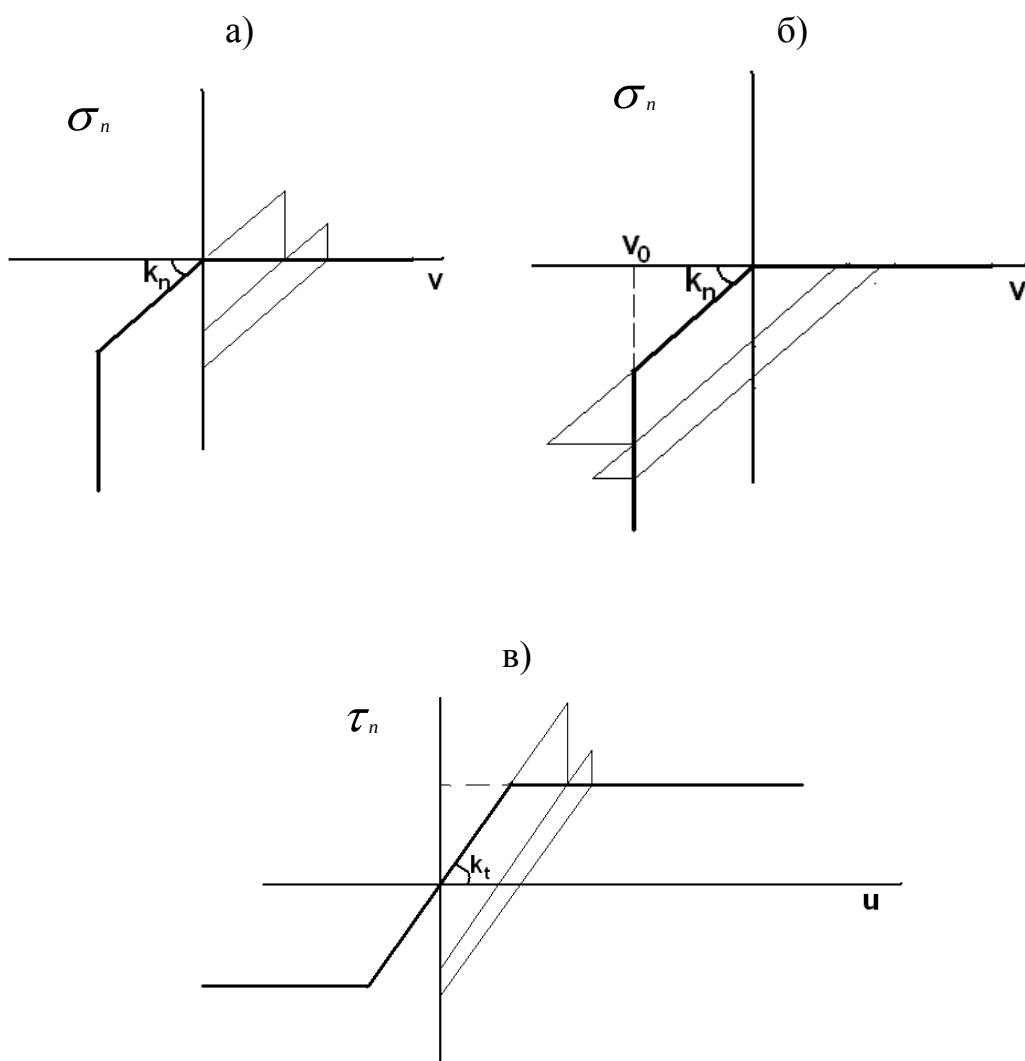


Рис. 1. Схемы применения итерационных процедур методов начальных напряжений и начальных деформаций для зависимостей напряжения-относительные смещения

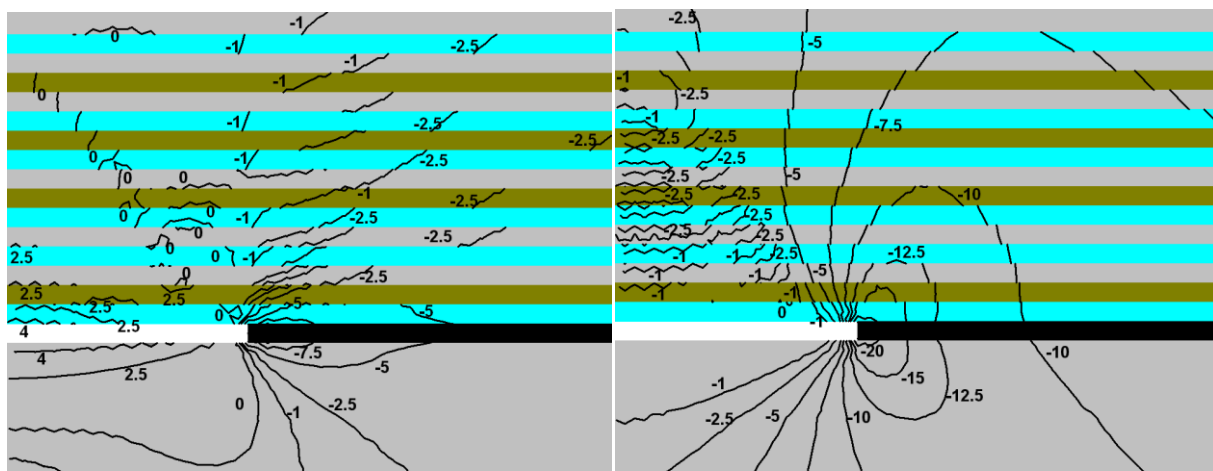


Рис. 2. Распределение главных напряжений σ_1, σ_2 [МПа] при учете контактного взаимодействия между слоями

Это приводит к интенсификации процесса обрушения пород в выработанное пространство, разрушению массива вдали от зоны обрушения: в области сдвига и изгиба слоев (рис. 3). Для описания условий разрушения пород в слоях и обрушения их выработанное пространство применялся критерий достижения растягивающими напряжениями предельных значений. Моделирование разрушения осуществлялось также с помощью итерационных процедур методов начальных напряжений и начальных деформаций [7].

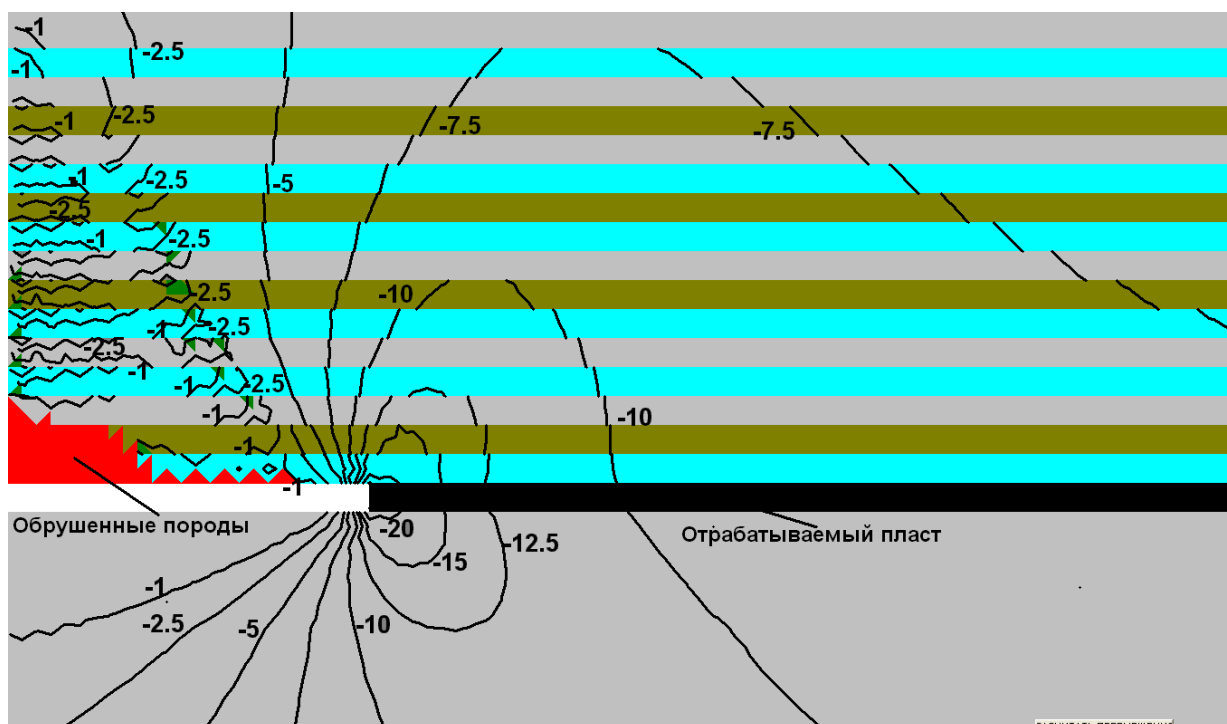


Рис. 3. Распределение второго главного напряжения при учете контактного взаимодействия между слоями, разрушения пород в слоях и их обрушения в выработанное пространство

Анализ выполненных расчетов показал, что:

1. учет последовательности раскрытия межслоевых контактов при ширине отработанного пространства 50 метров приводит к распространению зоны раскрытия на высоту, приблизительно равную значению ширины отработанного пространства. По сравнению с упругим решением площадь этой зоны увеличивается в 2.5 – 3 раза;

2. при задании фактических значений пределов прочности пород на растяжение моделирование разрушения горных пород в слоях, их обрушение в выработанное пространство при ширине выработанного пространства 50 метров позволяет оценить высоту зоны обрушения в пределах 3-4 мощностей отрабатываемого пласта;

3. существуют значения пределов прочности горных пород на растяжение, при которых процесс обрушения подработанной толщи может дойти до земной

поверхности. При ширине выработанного пространства 50 метров эти значения составляют 1.5МПа для песчаников и 0.5МПа для аргиллитов и алевролитов;

4. Увеличение ширины выработанного пространства до 100 метров приводит к росту высоты зоны обрушения пород, постепенному развитию области разрушения подработанной толщи до земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвигение и разрушение горных пород. — М.: Наука, 2005.
2. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
4. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987.
5. Введение в механику скальных пород. / Д.Х.Троллоп, Х.Бок, Б.С.Бест и др. — М.: Мир, 1983.
6. Серяков В.М. Аналогия модели контакт-элемента и деформационной теории пластичности // Аналитические методы и применение ЭВМ в механике горных пород: Сб. научн. тр. ИГД СО АН СССР — Новосибирск, 1982.
7. Серяков В.М. К расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород над выработанным пространством // ФТПРПИ. — 2009. — № 5.

© В. М. Серяков, 2014

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАБОТКИ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ ЗА СЧЕТ ПОПУТНОЙ ДОБЫЧИ И УТИЛИЗАЦИИ МЕТАНА

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 механики горных пород, тел. (383)217-09-43, 8-913-766-24-53, e-mail: scritsky@mail.ru

Предложена технология совмещения процесса добычи угля с попутной добычей метана, использование которой обеспечит снижение затрат на проветривание выемочного участка, поддержание высокой производительности очистного забоя, предотвращение аварий, обусловленных взрывами метана, а также получение дополнительного экономического эффекта от утилизации попутно добываемого метана.

Ключевые слова: уголь, пласт, метан, проветривание, выемочный участок, выработанное пространство, угле-породный массив, взрыв, дегазация, добыча и утилизация метана.

IMPROVED SAFETY AND EFFICIENCY OF UNDERGROUND FLAT COAL MINING BY MEANS OF COLLATERAL METHANE RECOVERY AND UTILIZATION

Vladimir A. Skritsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Principal Researcher, tel. (383)217-09-43, e-mail: scritsky@mail.ru

The author offers the technology of concurrent coal mining and methane recovery, that will allow working area ventilation cost-saving, higher stope production maintenance, methane explosion accident prevention, as well as additional economic benefit due to utilization of collateral recovery methane.

Key words: coal, bed, methane, ventilation, working area, mined-out void, coal and rock mass, explosion, degassing, methane recovery and utilization.

В настоящее время на юге Кузбасса, по заимствованной за рубежом технологии, на Талдинском и Нарымско-Осташковском участках производятся работы по бурению с поверхности протяженных горизонтальных скважин для промышленной добычи угольного метана. Предполагается, что после завершения работ по такой добыче метана угольные пласты будут существенно дегазированы. В результате при последующей отработке их подземным способом, будут исключены взрывы метана, внезапные выбросы угля и газа и прочие опасности, обусловленные метанообильностью угольных пластов.

При очевидной актуальности предварительной дегазации угольных месторождений следует отметить, что, из-за особенностей технологии добычи угольного метана через горизонтальные скважины, пробуренные с поверхности, она не совместима с одновременной подземной добычей угля.

Взрывы метана в угольных шахтах происходят практически ежегодно. Наиболее часто взрывы и возгорания метана происходят в шахтах, отрабатывающих крутые пласты угля. Однако большая часть таких шахт к настоящему времени уже закрыта, а оставшиеся находятся в стадии ликвидации. Реже взрывы метана происходят и при отработке пологих пластов угля. Но при этом необходимо отметить, что взрывы метана, в случае если происходят в шахтах отрабатывающих пологие пласты, то зачастую имеют катастрофические последствия по количеству одновременно травмируемых людей и масштабу разрушений.

Только в шахтах Кузбасса при отработке пологих пластов за период с 2001 по 2007 годы произошло 7 взрывов метана, при которых было травмировано 278 человек, в том числе 234 – со смертельным исходом [1]. В 2010г. на крупнейшей в России шахте «Распадская» тоже произошел взрыв метана, при котором погибло 91 человек, в том числе 20 горноспасателей.

В настоящее время в Кузбассе добыча угля шахтным способом производится преимущественно из пологих и наклонных угольных пластов. Однако опасность возникновения взрывов метана при этом сохраняется. Поэтому, вне зависимости от результатов работ по опытно-промышленной добыче угольного метана через пробуренные с поверхности протяженные горизонтальные скважины, проблема дегазации высокопроизводительных выемочных участков в действующих шахтах и предотвращения в них взрывов метана является весьма актуальной, решение которой имеет также большое социальное значение.

Отработка пологих и наклонных угольных пластов производится системой ДСО. Проветривание выемочных участков в последние годы осуществляется, как правило, комбинированным способом. На рис. 1 представлена схема выемочного участка, используемая при отработке пологих пластов угля системой ДСО.



Рис. 1. Отработка выемочного столба лавой по пласту 50 на шахте «Ульяновская»

Из схемы, представленной на рис. 1, видно, что при подобном способе отработки практически весь метан, выделяющийся в пределах отработываемого выемочного участка, удаляется из шахты средствами вентиляции. При этом следует отметить, что из всего количества метана, выделяющегося в процессе отработки выемочных столбов, до 80% выделяется в выработанном пространстве из надрабатываемого и подрабатываемого углепородных массивов. И лишь порядка 20% метана выделяется непосредственно в очистном забое [2].

При таком раскладе газовыделения в пределах действующих выемочных участков было бы логично из выработанного пространства метан удалять изолированно, минуя вентиляционную сеть шахты. Однако традиционно используемый способ подготовки и порядок отработки выемочных столбов практически исключает такую возможность. Это обусловлено исторически сложившейся практикой, когда вентиляционный и конвейерный штреки от монтажной камеры лавы проходятся на восстание под углом $3-5^\circ$. Поэтому очистной забой лавы всегда находится на более высокой геодезической отметке, нежели монтажная камера. В результате лава, по мере её подвигания, постоянно находится на более высокой геодезической отметке, относительно монтажной камеры. Соответственно весь выделяющийся в выработанном пространстве метан мигрирует в направлении максимальной высотной отметки (к очистному забою), скапливаясь в куполах и в обрушенных породах, примыкающих к очистному забою, как это представлено на рис. 2 [3]. Из этого скопления метан поступал и поступает в рабочее пространство лавы. Поэтому, чтобы сократить поступление метана из выработанного пространства в лаву стали использовать комбинированный способ проветривания высокопроизводительных выемочных участков.



Рис. 2. Примыкание скопления метана к очистному забою из-за разности в высотных отметках по длине выемочного столба

Подобное примыкание скоплений метана, том числе с высокой концентрацией метана (в куполе обрушения пород), к рабочему пространству очистного забоя представляет большую опасность, которая порой проявляется взрывами метана, происходящими, как правило, неожиданно и поэтому протекающими с тяжелыми последствиями.

Очевидно, чтобы исключить возможность выделяющемуся в выработанном пространстве метану аккумулироваться в примыкающих к очистному забойу обрушенных породах, необходимо изменить направление отработки выемочного столба таким образом, чтобы монтажная камера лавы располагалась не на минимальной высотной отметке подготавливаемого к отработке выемочного столба, а на максимальной. В этом случае очистной забой лавы постоянно, по мере отработки выемочного столба, будет находиться на меньшей высотной отметке, чем монтажная камера. Соответственно, весь метан, выделяющийся в выработанном пространстве, и метан, частично попадающий в него из очистного забоя, будут мигрировать в направлении монтажной камеры, формируя там, в куполе обрушения пород, концентрированное скопление метана. Из купола обрушения над монтажной камерой метан высокой концентрации, пригодной для утилизации, может удаляться в дегазационный трубопровод через дегазационную скважину, пробуренную из фланговой наклонной выработки.

Схема разработанного в ИГД СО РАН технического решения дегазации выработанного пространства, исключающего возможность метана из выработанного пространства поступать в очистной забой и участвовать в нем и в действующих горных выработках выемочного участка во взрывах, представлена на рис. 3 [4].

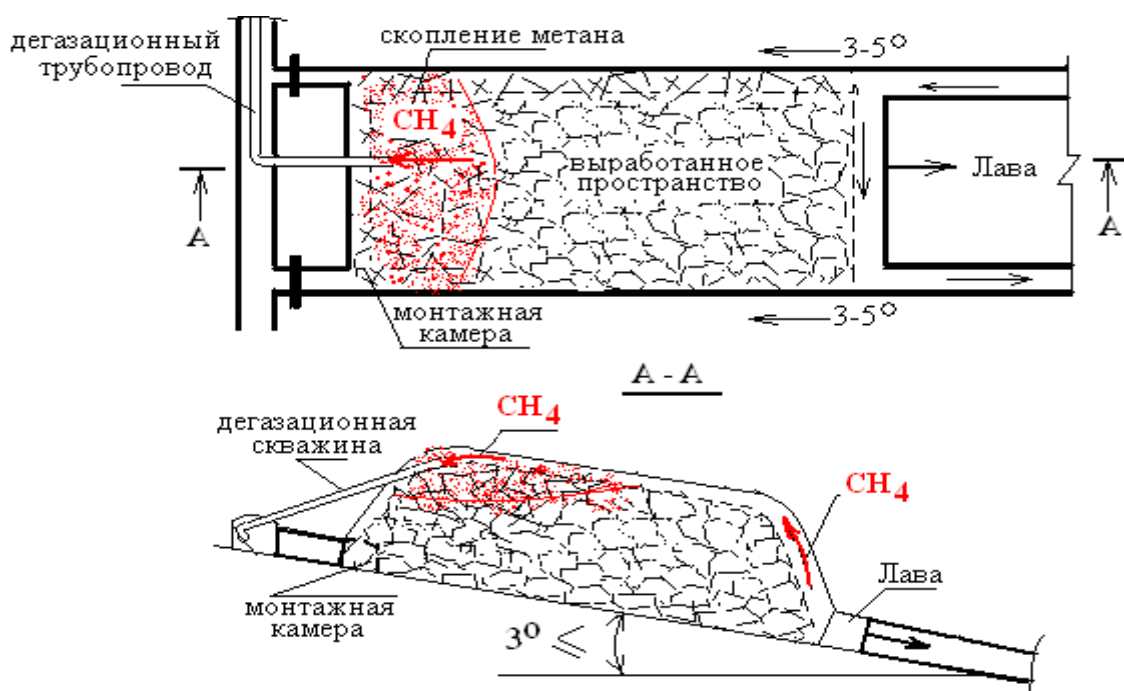


Рис. 3. Способ дегазации выработанного пространства и попутной добычи метана при отработке пологих и наклонных пластов угля системой ДСО

Внедрение в производство разработанного в ИГД СО РАН способа дегазации выработанного пространства, при использовании которого будут предотвращены взрывы метана в очистных забоях и в прилегающих к ним горным вы-

работкам позволит не только решить актуальную социально значимую проблему, но и получить существенный экономический эффект. Помимо опосредственного для конкретной шахты эффекта от сокращения затрат на ликвидацию аварий и от потерь добычи угля, в случае произошедшего взрыва метана, будет получен и реальный экономический эффект. Реально получаемый шахтой экономический эффект будет складываться из снижения затрат на тепловую и на электрическую энергию.

Так как большая часть метана, выделяющегося в действующих выемочных участках, будет изолированно каптироваться, то количество воздуха, потребное для проветривания горных выработок шахты, понизится при одновременном повышении надежности проветривания очистных забоев. Соответственно, снизится расход электроэнергии для подачи в шахту меньшего количества воздуха. Учитывая, что дебит кондиционного для утилизации метана, добываемого с одного выемочного участка попутно с добычей угля, может достигать 10-20 и более м³/мин, то, в зависимости от применяемого способа его утилизации, также будут сокращены затраты на тепловую или на электрическую энергию потребляемые шахтой.

Следует также отметить, что попутная с углем добыча метана на шахтах окажет положительное влияние и на экологию окружающей среды за счет снижения выбросов в атмосферу метана, который является парниковым газом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В.Н., Скрицкий В.А. Аналитический обзор взрывов метана в шахтах Кузбасса // Уголь. 2012. № 2. С. 29-32.
2. Скрицкий В.А., Шлапаков П.А., Колыхалов В.В. и др. О результатах анализа аварий на высокопроизводительных выемочных участках шахт Кузбасса / Вестник НИЦ ВостНИИ. – 2013. – № 1.2. – С. 125-129.
3. Скрицкий В.А. Взрывы метановоздушной смеси в угольных шахтах Кузбасса. Причины и способы их предотвращения // Горная промышленность. 2008, № 4. – С. 78–80.
4. Патент на изобретение № 2360128 (Россия), МПК E21F 7/00. Способ дегазации выработанного пространства Оpubл. – Б.И. – № 18, 2009.

© В. А. Скрицкий, 2014

СВЯЗЬ ПРОЧНОСТИ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ТЕРРИГЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД С ИХ СТРУКТУРОЙ (НА ПРИМЕРЕ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД КУЗБАССА)

Александр Савельевич Танайно

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией структурного анализа и пробоподготовки, тел. (383)334-88-80, e-mail: tanaino@misd.nsc.ru

Предлагается метод количественной оценки структуры горных пород по слагающим ее компонентам. Получена связь обобщённого показателя структурного строения песчаников, алевролитов, аргиллитов с их прочностью на одноосное сжатие.

Ключевые слова: осадочные горные породы, структура, физико-механические свойства, каноническая шкала свойств горных пород.

CORRELATION OF UNIAXIAL COMPRESSION STRENGTH AND STRUCTURE IN TERRIGENOUS ROCKS (IN TERMS OF COUNTRY ROCK MASS IN KUZBASS)

Aleksandr S. Tanaino

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Head of Laboratory for Structural Analysis and Sample Preparation, tel. (383)334-88-80, e-mail: tanaino@misd.nsc.ru

The author proposes the method of quantitative evaluation of rock structure based on the rock components. The generalized index of structure of sandstone, siltstone and argillite is correlated with their uniaxial compression strength.

Key words: sedimentary rocks, structure, physico-mechanical properties, canonical scale of properties of rocks.

Структура горной породы является её важнейшим диагностическим и классификационным признаком наряду с минеральным и химическим составом. Изучение терригенных пород ведется на эмпирическом уровне без привлечения количественных методов для оценки их структуры. В [1] изложены вопросы становления понятий структура и текстура горных пород. Несмотря на то, что понятие структуры включает размеры составных частей породы, в подавляющем числе разновидностей структуры горных пород характеризуются вербально. При этом в наименованиях отражается в основном текстурный мотив. Автором выполнен анализ наименований структур, представленных в [1]. Из более 1000 наименований, только в 29-ти приводятся численные значения размеров естественных отдельностей (зерен). В связи с этим актуальной является задача: разработка метода представления микроструктуры горных пород количественными оценками. Сложность решения задачи обусловлена её многофакторностью и разными единицами измерения компонент структуры (размеры и формы зерен, пористость, влажность, состав цемента и др.).

Сущность методологии количественной оценки микроструктуры.

Воспользуемся [2], где показана возможность представления свойств горных пород в канонической шкале m -го порядка на основании установленной закономерности блочно-иерархического строения. Распределение свойств горных пород в этой шкале по уровням иерархически организованной кластеризации определяется зависимостью:

$$d_z = d_0 \cdot \sqrt[m]{2^Z}; Z=0,1,2,3,\dots,N, \quad (1)$$

где d_0 – значение свойства (например, размер зерна) на принятом базовом (нулевом) уровне; m -порядок шкалы (целые числа), отражающий генотип горной породы и естественность изменения границ свойства ($m=2,3,4,\dots$); Z -уровень квантования (кластеризации) значения свойства; d_z –значение свойства на уровне Z .

Очевидно, что при $Z=0$ следует $d_z=d_0$, что определяет «нуль» шкалы, а значениями $Z=1,2,3,\dots,N$ характеризуются последующие границы распределения значений структурных компонент.

Из (1) определим:

$$Z = 1.44274 \cdot m \cdot \ln(d_z/d_0). \quad (2)$$

Используя (1) и (2) при $m=2$, на примере распределения размеров зёрен по гранулометрическим классам покажем, что в шкале отображаются естественные границы. Существенно важным является принятие значения d_0 , так как им определяются все последующие распределения ряда (1). Естественность границ определяется качественными переходами свойств геовещества. Так, если размеры зёрен находятся в пределах $1 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-4}$ мм, то они определяют верхний предел коллоидных растворов, не подчиняющихся силе тяжести, имеющих один заряд для всех частиц, снятие которых вызывает коагуляцию раствора и осаждение[3]. Наблюдаемые размеры зёрен в цементированных глинистых породах находятся в пределах $<1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2}$ мм. Зёрна размером $1 \cdot 10^{-3}$ мм в достаточной мере можно отнести к нижней естественной границе зернистости и принять $d_0=1 \cdot 10^{-3}$ мм. Поскольку размер зёрен (d_z) в ряду (1) находится в степенной зависимости от Z , то логично его значением определять степень зернистости горной породы. Приняв d_0 равным минимальному размеру зерна в породе пелитовой структуры $d_0=1 \cdot 10^{-3}$ мм, из (2) получим:

$$Z_1 = 2.8854 \cdot \ln(d_z) + 19.932. \quad (3)$$

Используя (1) и (3) вычислены распределение зерен и степень зернистости (табл. 1). Проанализируем результаты расчётов на предмет наличия в них размеров зёрен сопряжённых с известными естественными гранулометрическими границами. Так, структуры с размерами зёрен <0.01 мм принято относить к пелитам с соответствующими свойствами в рыхлом (глины) и цементированном состоянии (аргиллиты). Такая граница получена и по расчётам: $d_z=(0.008+0.011)/2 \approx 0.01$ мм.

Размер 0.05 мм - предел разрешения зернистости глазом. С этой границей совпадает и скачок свойств: в более тонких осадках появляется связность, резко подскакивает высота капиллярного поднятия [4]. В табл. 1 эта граница получена расчётами: $d_z = (0.045 + 0.064) / 2 = 0.055 \approx 0.05$ мм. Естественное обоснование имеет и граница $d_z = 1.0$ мм (в табл. 1 $Z_1 = 19-20$), особенность которой заключается в том, что в этих пределах зерна представлены исключительно минералами или их обломками (минакласты). При этом зёрна размерами < 0.5 мм практически неокатанные. Отдельности, представленные сростками зёрен разных минералов, постепенно увеличиваются в пределах от 1 до 2 мм, а зёрна, размер которых > 2 мм, сложены существенно породами (литокласты) [5]. В табл. 1 эта граница представлена при $Z_1 > 22$. В литокластах форма зёрен уже существенно зависит от состава зёрен. Здесь начинают сказываться внутренние свойств пород.

Таблица 1

Представление структур, размеров зёрен и степени зернистости горных пород в канонической шкале второго порядка

Структура	Пределы размеров зёрен, мм: (от-до)/сред	Степень зернистости	Названия породы	Тип зернистости
Пелитовая	(0.0010-0.0014)/0.0012	0-1	Аргиллиты	Тонкозернистые
	(0.0014-0.0020)/0.0017	1-2		
	(0.0020-0.0028)/0.0024	2-3		Мелкозернистые
	(0.0028-0.0040)/0.0034	3-4		
	(0.004-0.006)/0.005	4-5		Среднезернистые
	(0.006-0.008)/0.007	5-6		
	(0.008-0.011)/0.010	6-7		Крупнозернистые
Алевритовая	(0.011-0.016)/0.014	7-8	Алевролиты	Тонкозернистые
	(0.016-0.023)/0.019	8-9		
	(0.023-0.032)/0.027	9-10		Мелкозернистые
	(0.032-0.045)/0.039	10-11		
	(0.045-0.064)/0.055	11-12		Среднезернистые
	(0.064-0.091)/0.077	12-13		
	(0.091-0.128)/0.109	13-14		Крупнозернистые
Псаммитовая	(0.128-0.181)/0.155	14-15	Песчаники	Тонкозернистые
	(0.181-0.256)/0.219	15-16		
	(0.256-0.362)/0.309	16-17		Мелкозернистые
	(0.362-0.512)/0.437	17-18		
	(0.512-0.724)/0.618	18-19		Среднезернистые
	(0.724-1.024)/0.874	19-20		
	(1.024-1.448)/1.236	21-22		Крупнозернистые
	(1.448-2.048)/1.748	22-23		

Из представленного выше следует, что в шкале по типу (1), при соответствующем базовом значении свойства (d_0) и порядка (m), появляется возможность отобразить кластеризацию отображаемых свойств горных пород с учётом естественных границ перехода из одного качественного состояния в другое.

Базируясь на вышеизложенном, общая методология получения обобщённого количественного показателя структуры (F_s) сводится к следующим действиям: 1. Сообразуясь с генетическим типом пород, определяются виды свойств, характеризующие их структуры. 2. Устанавливаются базовые значения (d_{0i}) каждого i -го свойства. 3. Измеряются значения выбранных свойств в исследуемом образце породы. 4. По (2), при обоснованных d_{0i} и m_i , вычисляются значения степени каждого свойства (Z_i). 5. Обобщённый показатель структуры определяется суммой:

$$F_i = \sum Z_i; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4)$$

В [1] приводится, широко используемое и в настоящее время, понятие структуры (по Заварицкому А.Н.): “Под структурой подразумеваются те особенности строения горной породы, которые обуславливаются *размерами, формой* и взаимным отношением составных частей пород (минералов, а так же стекла)”. Однако такое определение структуры не является исчерпывающим. К компонентам структуры дополнительно необходимо отнести: пористость, влажность в естественном состоянии, характер упаковки зёрен, тип цемента, однородность минерального состава. В настоящее время для измерения компонент структуры используются различные микроскопы, оснащённые соответствующим программным обеспечением. В качестве примера представительность результатов исследований зернистости представлена в табл. 2². Подобные результаты измерений получают при исследовании компоненты «Пористость» с соответствующими специфическими характеристиками.

Таблица 2

Результаты измерений фактора «Зернистость»

Число проанализированных зёрен 328	
Характеристика	Значение (от-до)/среднее
Размер зёрен, мкм	(16.445-271.691)/ 55.794
Площадь, кв.мкм	(212.400-57975.129)/ 4479.876
Периметр, мкм	(61.969-2683.710)/ 338.857
Круглый фактор формы (Ф)	(0.219-0.926)/ 0.620
Фактор компактности	(0.217-0.853)/ 0.567
Фактор удлинения	(0.215-1.000)/ 0.623
Фактор изрезанности	(0.382-1.039)/ 0.825
Межзерновое расстояние, мкм	(2.249-796.451)/ 46.045

² Данные получены с использованием программно-инструментального комплекса «Минерал С7» [6].

Вычисление степени зернистости конкретного образца породы выполняется по (3), где в качестве d_z используется среднее значение размера зерна.

Численное значение компоненты «плотность упаковки зёрен - Y » определяется соотношением: $Y = S_z / S_b$, где S_z – суммарная площадь занимаемая зёрнами; S_b – площадь обзора поверхности. В реальных условиях терригенных пород: $0.6 < Y < 1$. Приняв за базовое значение шкалы $Y_0 = 0.6$ и $m = 8$ по (2) получим выражение для вычисления степени упакованности зерен:

$$Z_2 = 11.9 \cdot \ln(Y) + 5.896, Y = 0.6 \div 1. \quad (5)$$

Из представленных в табл. 2 характеристик для представления компоненты структуры «степень формы зерна» используем характеристику «круглый фактор формы», количественные значения которого находятся в пределах: $\Phi = 0.1 - 1$ (чем меньше Φ тем более форма зерна отклоняется от округлённой). Исследованиями автора установлено, что для представления степени формы (Z_3) необходимо использовать каноническую шкалу третьего порядка (в (2) $m = 3$). Приняв за базовое значение $\Phi_0 = 0.1$ получим:

$$Z_3 = 4.33 \cdot \ln(\Phi) + 9.97, \Phi = 0.1 \div 1. \quad (6)$$

Для представления степени пористости (P) терригенных пород по типу (2) обосновано и получено (при $m = 2$ и $P_0 = 1$) выражение для представления степени пористости:

$$Z_4 = 2.8854 \cdot \ln(P), P = 1 \div 30. \quad (7)$$

Компонента, которую автор считает необходимым отнести к числу характеризующих микроструктуру, представляется отношением влажности (W , %) в естественном состоянии к пористости (P , %), определяемое в виде коэффициента: $R_c = \exp(-W/P)$. В некотором смысле этим коэффициентом определяется заполненность порового пространства флюидом. В [2] коэффициент R_c использован для определения соотношений прочности пород в водонасыщенном и сухом состояниях. Степень вклада данного фактора в обобщённый количественный показатель структуры определим выражением:

$$Z_5 = 5.78 \cdot \ln(R_c) + 7.95, R_c = 0.3 \div 1. \quad (8)$$

Не менее важной компонентой структуры горной породы является её минеральный состав. Представление минералогического состава в структурном строении предполагает отображение степени (Z_6) массивности горных пород:

$$\rho = 0.01 \cdot \sum \rho_i \eta_i; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad Z_6 = 11.604 \cdot \ln(\rho) + 1, \quad (9)$$

где ρ – средневзвешенная плотность минералов слагающих породу, г/см^3 ; η_i – доля i -го минерала, %; ρ_i – плотности i -го минерала, г/см^3 .

При определении Z_6 (согласно (1)) в качестве базовой плотности принята плотность воды, 1г/см^3 , а порядок шкалы $m=8$.

Следуя (4), получим обобщённый количественный показатель микро-структуры породы, представленный суммой степеней учитываемых факторов:

$$G_S = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 \quad (10)$$

В зависимости от наличия данных о свойствах горных пород, в (10) некоторые слагаемые могут отсутствовать. В таком случае можно говорить только о локальных показателях микроструктуры. Если имеются информация для представления всех шести слагаемых в (10) по каждой оцениваемой породе, то в этом случае G_S характеризует их микроструктуру, в своего рода, в ивариантной канонической шкале, а по количественному значению G_S можно судить о подобии структур.

Количественная оценка микроструктуры основных типов вмещающих пород Кузбасса. Здесь специально использованы данные о свойствах пород, полученные не по результатам экспериментов автора, а представленные в справочнике [7]. При этом в справочных данных представлена следующая информация: тип породы; уровни зернистости (не количественно, а вербально, т.е. типа: тонко-, мелко- и пр. зернистые); пористость, %; влажность, %. Данные о плотности упаковки зёрен, факторах их формы и минералогическом составе, традиционно, как в любом справочник, не представлены. Для количественной оценки зернистости автор использовал соотношения между вербальными наименованиями и соответствующими их количественными согласно табл. 1. В результате для оценки G_S использовалось только три следующих фактора:

$$\begin{aligned} G_S = Z_1 + Z_4 + Z_5 &= 2.8854 \cdot \ln(d_z) + 19.932 + 2.8854 \cdot \ln(P) + 5.78 \cdot \ln(R_c) + 7.95 \approx \\ &\approx 2.8854 \cdot [\ln(d_z) + \ln(P) + 2 \cdot \ln(R_c)] + 27.882. \end{aligned} \quad (11)$$

Используя данные о значениях прочности на одноосное сжатие (σ_s , МПа) каждого анализируемого образца, на рис.1 представлены результаты вычислений G_S по типам пород в виде зависимостей: $\sigma_s = f(G_S)$. Получены корреляционные связи между σ_s и G_S (уравнения трендов на рис.1). Приемлемые значения корреляционных отношений ($R^2=0.86-0.93$) являются основанием заключить, что предложенный метод количественной оценки микроструктуры терригенных горных пород адекватно отражает зависимость прочности пород от их структуры.

Выполненными по (11) вычислениями определились следующие значения G_S : для песчаников $-25 < G_S < 32$; для алевролитов $-19 < G_S < 27$; для аргиллитов $-13 < G_S < 22$. Как видно области значений по G_S , равно как и по σ_s , пересекаются (рис.2). Применительно к рассматриваемым типам пород сформировалось пять областей по значению обобщённого показателя структуры. Областям II и IV характерны неоднозначные значения прочности при равных показателях структуры: в области II для аргиллитов и алевролитов, а в области IV для алевролитов и песчаников. Характерно и обратное: равным значениям

прочности соответствуют разные значения показателя структуры (см. стрелки на рис. 2 при $\sigma_s=40$ МПа у аргиллитов и песчаников). Такое положение вполне естественно, так как известно, что равное значение прочности наблюдается у различных пород и обусловлено это, как показано автором, различными значениями обобщённого показателя микроструктуры в этих породах. Используя уравнения трендов (представлены на рис. 1) можно прогнозировать прочность соответствующих типов горных пород, исключая проведение экспериментов.

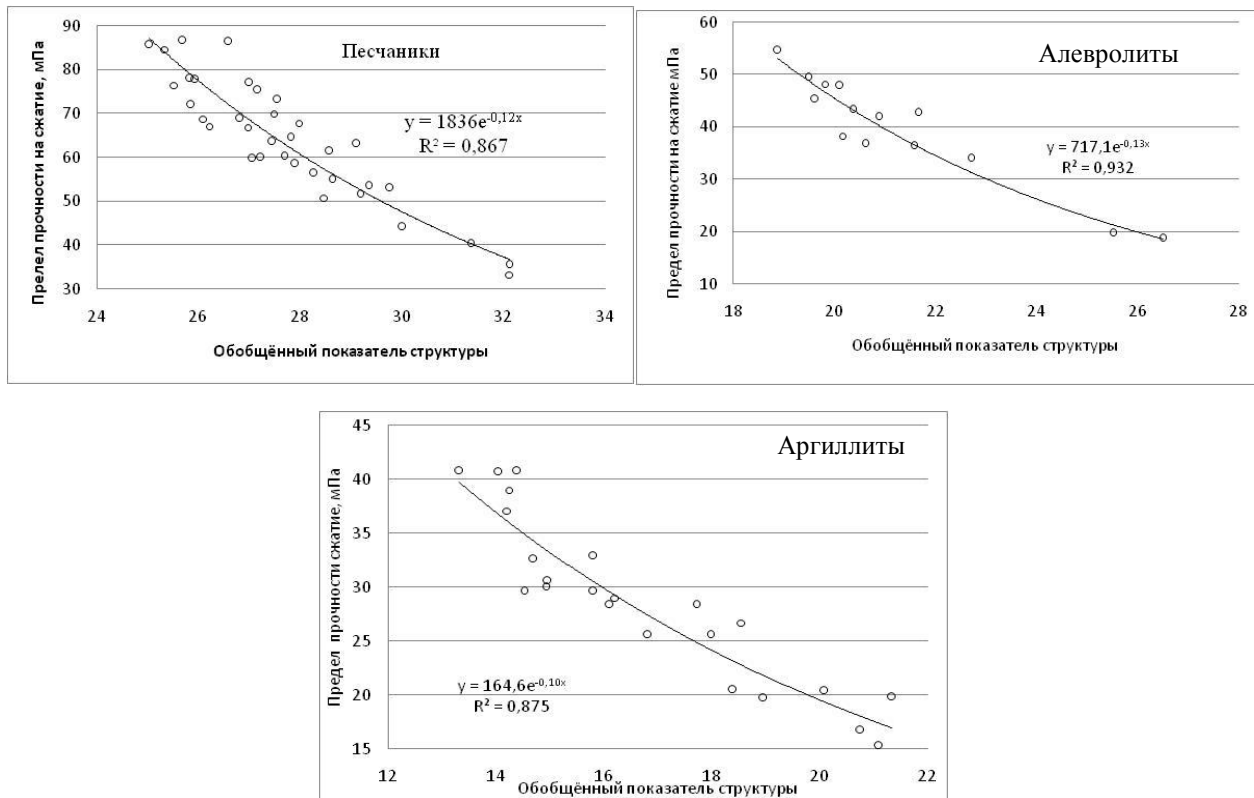


Рис. 1. Характер связи обобщённого показателя микроструктуры с прочностью на одноосное сжатие песчаников, алевритов и аргиллитов

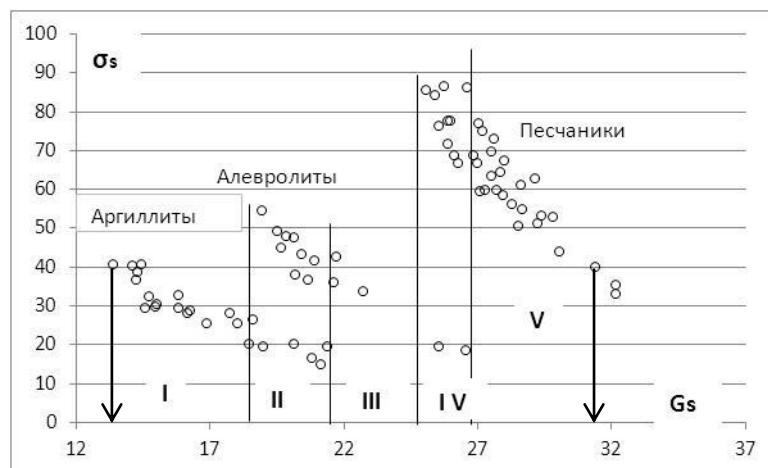


Рис. 2. Распределение значений пределов прочности по типам горных пород в зависимости от показателя микроструктуры

Закключение. Впервые предложен метод количественной оценки структуры горных пород по слагающим ее компонентам. Наличие тесных корреляционных связей между обобщённым показателем микроструктуры и прочностью на сжатие является критерием, подтверждающим правильность предложенного подхода. Дальнейшее развитие этого направления, по мнению автора, имеет теоретическое и практическое значение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Половинкина Ю. И. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических горных пород. Ч. 1-Ч. 3. Словарь терминов. – М., Недра, 1966.
2. Опарин В.Н., Танайно А.С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. –Новосибирск, Наука, 2011.
3. Краткая химическая энциклопедия. Т.2. М. Советская энциклопедия, 1963.
4. Фролов В.Т. Литология. Кн.1: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992.
5. Макаров В.П. Вопросы теоретической геологии.7. Элементы теории структур./Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2007. Одесса, Черноморье, 2007. Т.19. С. 27- 40.
6. <http://siams.com>.Автоматический комплекс для петрографических исследований керна (сертификат RU.C.31.005.A№ 18352).
7. Штумпф Г.Г., Рыжков Ю.А., Шаламанов В.А., Петров А.И. Физико-технические свойства пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник. – М.: Наука, 1972.

© А. С. Танайно, 2014

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ТАЛИКОВОЙ ЗОНЫ НЕЖДАНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Александр Петрович Тапси́ев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией подземной разработки рудных месторождений, тел. (383)217-08-21, e-mail: atapsiev@misd.nsc.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)217-06-46, e-mail: labprrm@list.ru

Предложен вариант системы разработки с закладкой, который может применяться в таликовой зоне Нежданинского золоторудного месторождения.

Ключевые слова: таликовая зона, система разработки, параметры технологии, порядок отработки.

DEVELOPMENT OF MINING METHODS FOR THE THAWED ZONE CONDITIONS OF THE NEZHDANINSKOE GOLD DEPOSIT

Aleksandr P. Tapsiev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng. Head of Underground Ore Mining Laboratory, tel. (383)217-08-21, e-mail: atapsiev@misd.nsc.ru

Vladimir A. Uskov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Leading Researcher, Underground Ore Mining Laboratory, tel. (383)217-06-46, e-mail: labprrm@list.ru

The paper describes the mining scenario applicable to the thawed zone development in the Nezhdaninskoe gold mine.

Key words: thawed zone, mining method, technology parameters, mining sequence.

Нежданинское золоторудное месторождение расположено на северном фланге Аллах-Юньского золотоносного пояса Южно-Верхоянской синклинали на территории Томпонского района Якутии. Месторождение приурочено к куполу Дыбинской антиклинали и в плане представляет собой вытянутую с юга на север полосу, простирающуюся от западного берега реки Тыры на юге до бассейна ручья Курум на севере (рис. 1).

Непосредственно на территории рудного поля постоянное население отсутствует. Деятельность ОАО «Южно-Верхоянской горнорудной компании» осуществляется преимущественно вахтовым методом. Снабжение электроэнергией осуществляется от автономной дизельной электростанции, работающей на привозном топливе.

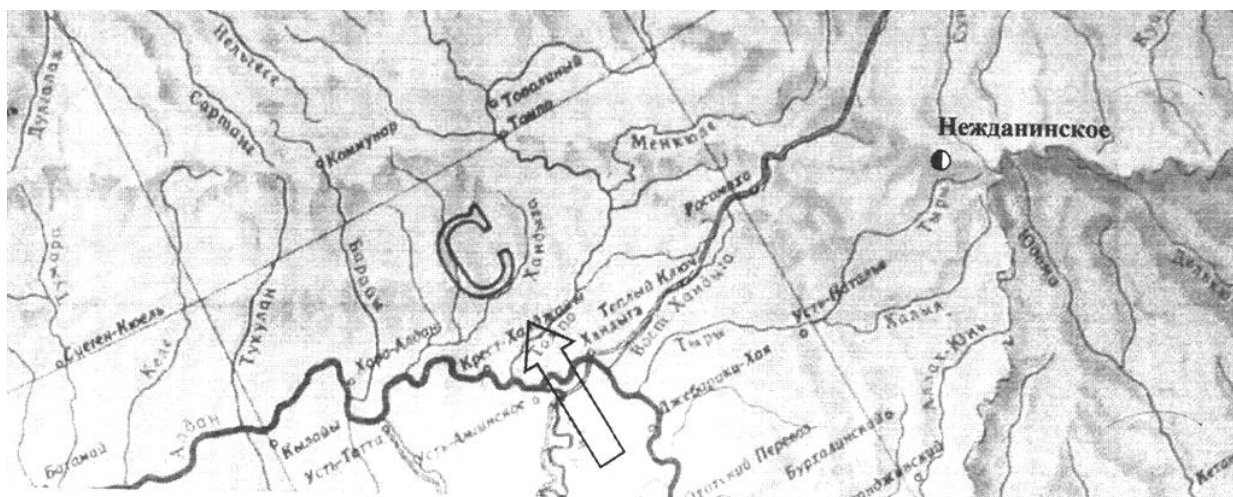


Рис. 1. Место нахождения Нежданинского месторождения

Руды Нежданинского месторождения по составу относятся к кварц-алюмо-силикатному золото-мышьяковистому малосульфидному типу. Промышленную ценность в рудах имеют только золото и серебро. Свинец, цинк, медь и другие попутные компоненты содержатся в очень малых концентрациях и не представляют экономического интереса.

Руды и вмещающие породы являются силикозоопасными по пыли (содержание свободной кремнекислоты изменяется в пределах от 21,5 до 66,7%).

Месторождение локализовано в толще ниже-верхне пермских мелкокристаллических осадочных пород, локально метаморфизованных в зеленосланцевые фации. Формация включает две свиты: нижняя толща приурочена к Джуптагинской свите, а верхняя – к Дыбинской свите.

Разломы Нежданинской системы являются основными вмещающими структурами рудной минерализации. Они имеют падение преимущественно на запад под углом 70° - 80° и, реже, обратное или вертикальное падение. Доминирующее простирание составляет 350° .

Климат района работ резко континентальный. По данным многолетних наблюдений среднемесячная температура января составляет $-40,4^{\circ}\text{C}$, а июля - $+15,8^{\circ}\text{C}$. Зима в районе малоснежная. Характерна сравнительно маловетренная погода.

Район месторождения расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью до 300 м. В долинах ручьев мощность многолетнемерзлой толщи уменьшается до 80-130 м. Наличие многолетнемерзлых пород препятствует инфильтрации осадков и способствует заболаченности почвы. В целом, подошва мерзлых пород сглажено повторяет рельеф (рис. 2). Мощность мерзлотной зоны от поверхности в пределах Нежданинского месторождения составляет $228 \div 257$ м. Многолетнемерзлые породы являются низкотемпературными. Температура в основании слоя затухания годовых колебаний (15-20 м) составляет минус $7,5^{\circ}$. Геотермический градиент ниже этого слоя колеблется в пределах $1,43-4,18^{\circ}\text{C}/100$ м.

Значительная часть балансовых запасов, имеющих повышенное содержание полезного компонента, располагается в таликовой зоне (рис. 2).

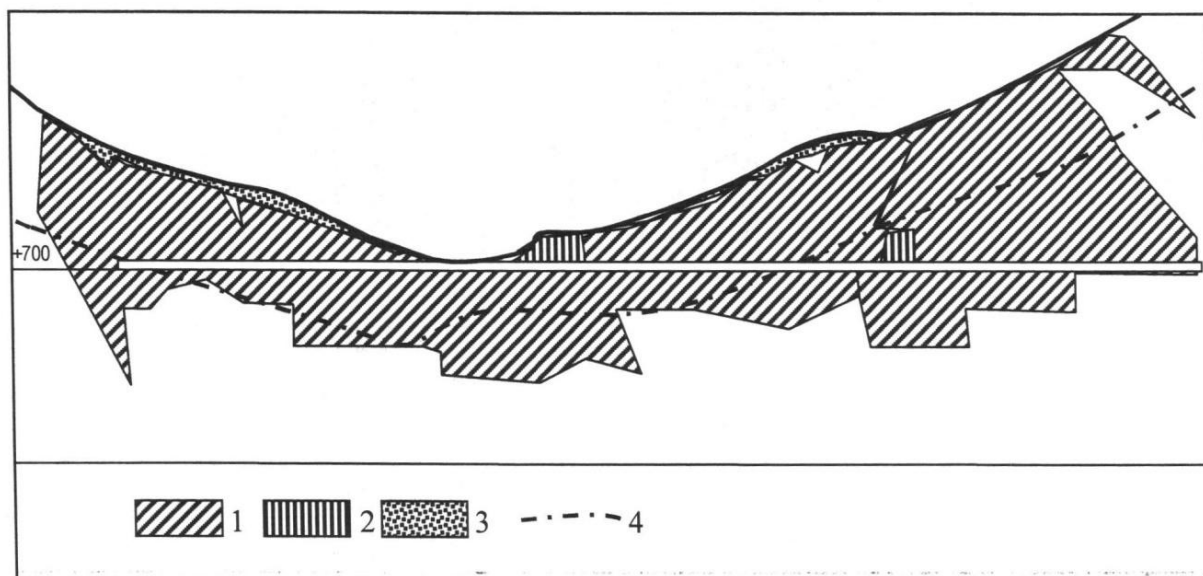


Рис. 2. Положение таликовой зоны в рудном контуре
Нежданнинского месторождения:

1 – балансовые запасы; 2 – отработано; 3 – аллювиальные отложения;
4 – нижняя граница многолетнемерзлых пород

Результаты исследования физико-механических свойств пород приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические свойства пород Нежданнинского месторождения

Показатели	Единица измерения	Типы горных пород		
		алевролит	сланец	руда
Плотность	кг/м ³	2740	2740	2790
Влажность	%	$\frac{0,25 \div 4,4}{1,5}$	$\frac{0,4 \div 5,0}{1,5}$	$\frac{0,4 \div 4,5}{1,6}$
Коэффициент теплопроводности	Ккал/м. град.	1,8	1,7	1,8
Предел прочности при сжатии	МПа	4,9-58,8	5,4-68,7	5,2-54,5
Предел прочности при растяжении	МПа	1,0-13,2	0,9-14,7	5,0-11,1
Модуль Юнга	ГПа	42	50	52
Сцепление	МПа	12	14	13
Угол внутреннего трения	град.	53	54	53

Руда и породы в пределах зоны многолетней мерзлоты устойчивые.

В зонах положительных температур устойчивость породных обнажений резко снижается, особенно на участках с высокой степенью трещиноватости, в зонах дробления и смятия.

Изучение физико-механических свойств основных типов пород и руд по разведочным штольням показало:

- алевролит – наиболее распространенная вмещающая порода ($65 \div 75\%$ от общей массы пород) и содержание кварца в ней достигает 70% ;
- алевролитовый сланец – кроме кварца, содержит полевые шпаты и микрокварцит;
- песчаник – имеет ограниченное распространение и представляет собой массивную, крепкую, мелкозернистую породу, представленную в основном зернами кварца.

Лед в породах содержится в виде льда-цемента, корок толщиной до 1 мм, прожилков и отдельных линз, достигающих мощности 1,5-3 см. Трещиноватость и льдистость в значительной мере влияют на прочностные свойства пород. Коэффициент крепости на участках таликовых зон снижается с $f = 12 \div 17$ до $f = 1 \div 6$ по шкале М. М. Протоджяконова.

В результате проведения разведочных работ и опытно-промышленной отработки рудных блоков месторождения установлено, что на устойчивость обнажений влияет не столько крепость пород, сколько интенсивность трещиноватости, заполняющих трещины материал и угол падения трещин.

Для отработки запасов, расположенных в мерзлотной зоне, в процентном соотношении могут быть эффективно использованы следующие системы разработки: этажного обрушения руды с донным выпуском (43,2%); подэтажного обрушения руды с торцовым выпуском (38,3%); этажного обрушения руды в целиках (повторная разработка, 2,5%); система разработки с магазинированием руды в блоках (1,6%). Подлежащие отработке (рис. 2) балансовые запасы в таликовой зоне (14,4%) требуют применения камерной системы разработки с закладкой выработанного пространства [1, 2].

Выемку камер осуществляют в восходящем порядке. Это обеспечивает снижение объемов подготовительно-нарезных работ и снижение затрат на транспортирование закладочного материала.

Порядок отработки камеры на подэтаже определяется мощностью рудного тела. При мощности рудного тела до 6 м отрабатывают камеры-секции длиной по 10 м по простиранию рудного тела, с последующей закладкой твердеющей смесью. Между рабочими блоками из трёх камер оставляют целики шириной 30 м (рис. 3). Целики отрабатывают во вторую очередь секциями по 10 м. Камеры второй очереди закладывают сыпучей породной закладкой.

Подготовку блоков на подэтажах осуществляют полевыми подэтажными транспортными штреками в лежащем боку рудного тела (рис. 3). К нарезным выработкам относятся буро-доставочные орты и подсечные буровые рудные штреки. Подготовительные и нарезные выработки закрепляют анкерной крепью и набрызг-бетоном. Бурение в камерах осуществляют веерами восходящих

скважин буровой установкой Simba M4S-ITH. При выпуске руды из блоков используют ПДМ САТ 1700G (США) с дистанционным управлением.

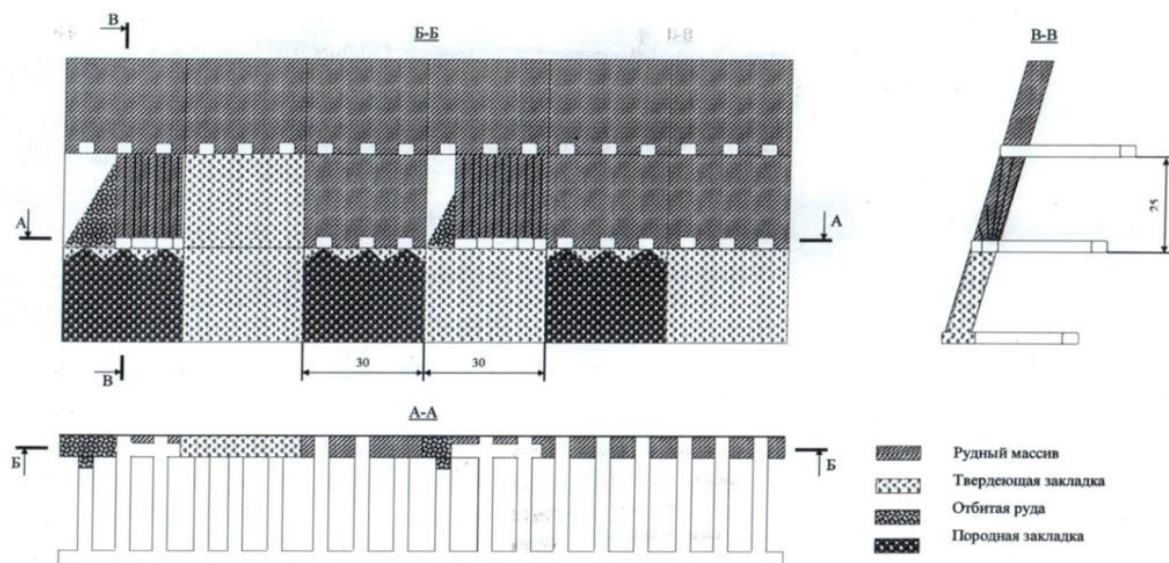


Рис. 3. Система разработки с закладкой для отработки таликовой зоны Нежданинского месторождения при мощности рудного тела до 6 м

Максимально допустимое расстояние между ортами по условиям выпуска определялось по формуле:

$$B = \frac{3b}{2} + \frac{2h_{\text{п}}}{\tan \varphi},$$

где b – ширина выработки; $h_{\text{п}}$ – высота подэтажа; φ – угол падения рудного тела.

Таким образом, для отработки запасов таликовой зоны предлагается камерная система разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства твердеющим составом и сыпучей породной закладкой.

Ожидаемая производительность забойного рабочего – 80-130 м³/см., производительность блока – 180-300 т/см.

Принятая технология ведения работ и показатели по системе разработки являются предварительными. Окончательное обоснование технологических параметров возможно после проведения опытно-промышленных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анушенков А.Н., Тапсиев А.П., Усков В.А., Артеменко Ю.В. Новая технология трубопроводного транспорта закладочных смесей на большие расстояния // «Современные технологии освоения минеральных ресурсов»: сб. научных трудов VII Междунар. науч.-техн. конф. (Красноярск 23-25 апреля 2009 г.). Выпуск 7 (ч. 1). ИПК СФУ. – Красноярск. – 2009. – с. 153-161.
2. Патент РФ № 2454540 Способ управления горным давлением / Фрейдин А.М., Васичев С.Ю., Уфатова З.Г., Тапсиев А.П., Усков В.А. – БИ № 18, 2012.

© А. П. Тапсиев, В. А. Усков, 2014

МЕТОД ОЦЕНКИ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Нелли Александровна Мирошниченко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-09-30, e-mail: mna@misd.nsc.ru

Антон Владимирович Панов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)217-09-30, e-mail: anton-700@yandex.ru

Предложен метод оценки пространственного распределения давления флюида в разрабатываемом продуктивном пласте. Метод основан на решении граничной обратной задачи по данным измерения приращений смещений на дневной поверхности.

Ключевые слова: массив горных пород, продуктивный пласт, давление, обратная задача, геодезические данные, смещения, целевая функция.

RESERVOIR PRESSURE EVALUATION IN HYDROCARBON ACCUMULATION DEVELOPMENT BASED ON GEODETIC DATA

Nelli A. Miroshnichenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk 54 Krasny prospect, PhD Eng, Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-09-30, e-mail: mna@misd.nsc.ru

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate Student, tel. (383)217-09-30, e-mail: anton-700@yandex.ru

The authors propose the method of assessment of fluid pressure distribution in the producing reservoir based on solution of boundary inverse problem using measurements of daylight surface displacement increments.

Key words: rock mass, producing reservoir, pressure, inverse problem, задача, geodetic data, displacement, objective function.

Современное состояние добывающей промышленности в значительной мере связано с использованием интенсивных технологий эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых и углеводородов. В этих условиях вопросы мониторинга процессов деформирования земной поверхности в регионах с повышенной техногенной нагрузкой на недра приобретают все более актуальное значение. Развитие космической геодезии и совершенствование методов обработки данных дистанционного зондирования позволяют с высокой точностью регистрировать смещения и деформации поверхности [1–3], которые мо-

гут быть использованы для диагностики состояния разрабатываемых залежей полезных ископаемых, в том числе углеводородного сырья.

В настоящей работе по данным измерения приращений смещений на дневной поверхности производится оценка пространственного распределения давления в разрабатываемом продуктивном пласте на основе решения граничной обратной задачи.

Рассмотрим прямую задачу в постановке, позволяющей использовать модель плоского деформированного состояния. Пусть в момент времени $t = 0$ горизонтальный продуктивный пласт вскрывается прямолинейной батареей скважин (рис. 1). Процесс массопереноса в пласте описывается системой уравнений линейной теории фильтрации, включающей закон сохранения массы

$(\phi\rho)_{,t} + (\rho w_i)_{,i} = 0$, закон Дарси $w_i = -\frac{k}{\eta} p_{,i}$ и уравнение состояния

$p/p_0 = \rho/\rho_0$, где p , η и ρ – давление, вязкость и плотность флюида, соответственно; p_0 – атмосферное давление; w_i – компоненты скорости, $i = x, z$; ϕ – пористость; k – проницаемость. Для пласта формулируются начальное $p(x, z, 0) = p_c$ и граничные условия: $p_{,z}(x, z_1, t) = p_{,z}(x, z_2, t) = 0$, $p(0, z, t) = p_0$, $p(L_x, z, t) = p_c$, в которых p_c – давление на контуре питания скважины; L_x – его протяженность.

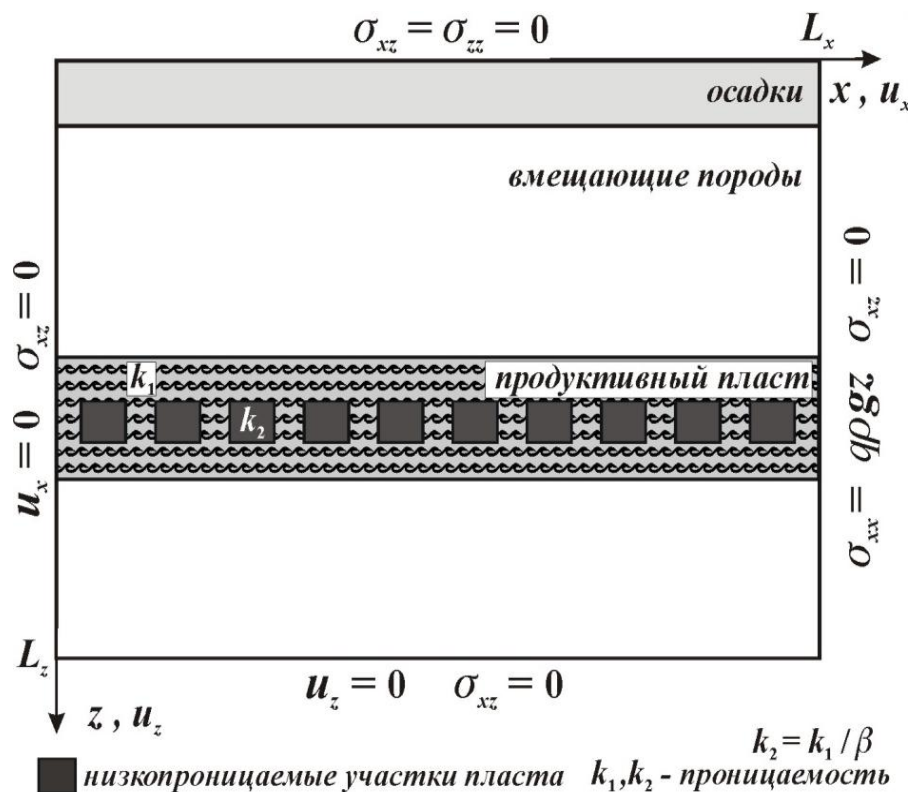


Рис. 1. Схема вертикального сечения расчетной области и граничные условия

Деформирование среды описывается пороупругой моделью (модификация модели Био), состоящей из уравнений равновесия $\sigma_{ij,j} + \rho_r g \delta_{iz} = \psi p_{,i}$; закона Гука $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$ и соотношений Коши $\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i})$, где u_i – смещения; σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций ($j = x, z$); $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}$, ρ_r – плотность пород; g – ускорение свободного падения; δ_{ij} – символ Кронекера; λ и μ – параметры Ламе; $\psi = \varphi$ в пласте и $\psi = 0$ во вмещающем массиве. Горизонтальная составляющая природного поля напряжений характеризуется коэффициентом бокового отпора q . Условия на границе расчетной области $\{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z\}$ указаны на рис. 1.

Алгоритм решения прямой задачи основан на совместном использовании конечно-разностного метода переменных направлений [4] и метода конечных элементов (оригинальный код). Для расчетов выбраны следующие значения физических свойств пород (E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона коллектора):

Таблица 1

Физические свойства пород

	E , ГПа	ν	ρ_r , кг/м ³
Осадки	8	0.22	2200
Вмещающие породы	20	0.25	2500
Продуктивный пласт	15	0.25	2500

Вдоль пласта было задано регулярно-неоднородное распределение проницаемости k : в блоках (обозначены темными прямоугольниками на рис. 1) величина k уменьшалась в β раз, что позволило получить неравномерное по пространству поле давлений (рис. 2).

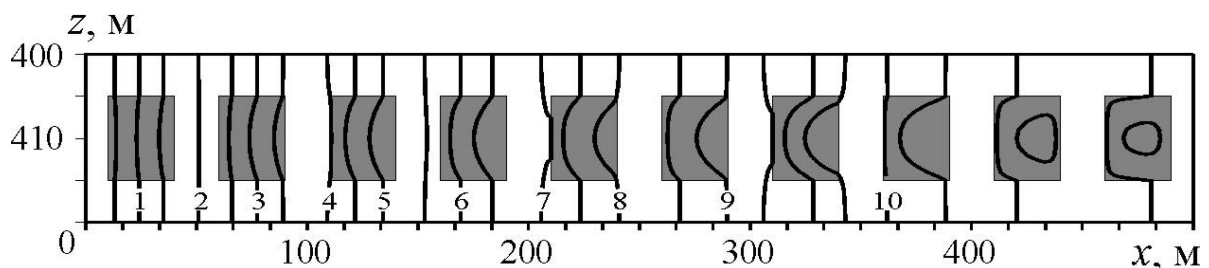


Рис. 2. Распределение давления в пласте ($\beta = 500$, $t = 360$ сут.)

Численные эксперименты показали, что вариация смещений на дневной поверхности зависит не от пространственного распределения пластового давления, а от давления, осредненного по мощности пласта:

$$p(x, t) = \frac{1}{H} \int_{z_1}^{z_2} p(x, z, t) dz,$$

эпюры которого в различные моменты времени при $\beta=500$ показаны на рис. 3. Небольшие флуктуации p обусловлены неоднородностью проницаемости.

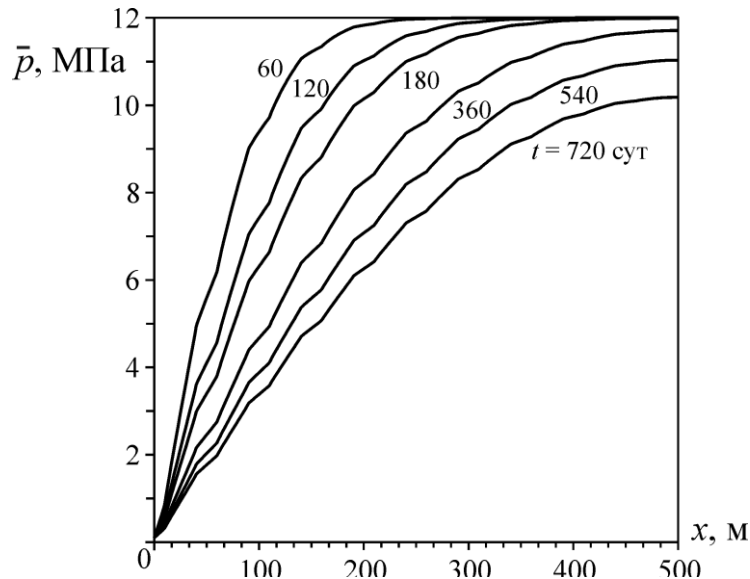


Рис. 3. Распределение среднего давления p в различные моменты времени

Аппроксимируем $p(x, t)$ функцией $p(x, t) \approx B - (B - A) \exp(-Cx / L_x) p_c$, где p_c – контурное давление. Для зависящих от времени параметров A , B и C выполнены неравенства $0 < A < B < 1$, $C > 0$, и эти параметры с достаточной для практики детальностью описывают состояние пласта в процессе разработки.

Сформулируем граничную обратную задачу: для некоторого момента времени $t = t_*$ требуется определить значения A , B и C по приращениям смещений $U_i^*(x_m)$, замеренным на дневной поверхности (x_m – координаты точек поверхности, где регистрируются смещения), полагая свойства вмещающей среды известными. Обратные задачи, использующие в качестве входных зарегистрированные на земной поверхности данные, рассмотрены в [5 – 6], где предложены методы количественной оценки деформационно-прочностных показателей конструктивных элементов технологий отработки твердых полезных ископаемых.

Построим целевую функцию $\Phi(A, B, C) = \delta \Phi_x(A, B, C) + (1 - \delta) \Phi_z(A, B, C)$, в которой $\Phi_i(A, B, C) = \sum_m \Delta u_i(x_m, 0, A, B, C) - U_i^*(x_m)$, а Δu_i – “теоретические”

приращения смещений. Минимум (A_*, B_*, C_*) функции Φ является решением обратной задачи.

Анализ структуры Φ во всем диапазоне изменения ее аргументов показал, что при $0.25 \leq \delta \leq 0.75$ целевая функция имеет единственный минимум при относительной амплитуде помехи α до 40%, поэтому сформулированная обратная задача однозначно разрешима. Пример линий уровня Φ при $A_*=0.1$, $B_*=0.9$, $\delta=0.5$ и $\alpha=0.4$ в сечениях $C=2.5$, $C=C_*=5$, $C=7.5$ представлен на рис. 4а-в. Пунктирной линией показана проекция траектории соответствующего итерационного процесса на плоскость $C=C_*$ (рис. 4б).

Поиск точки минимума Φ проводился модифицированным методом сопряженных градиентов [7].

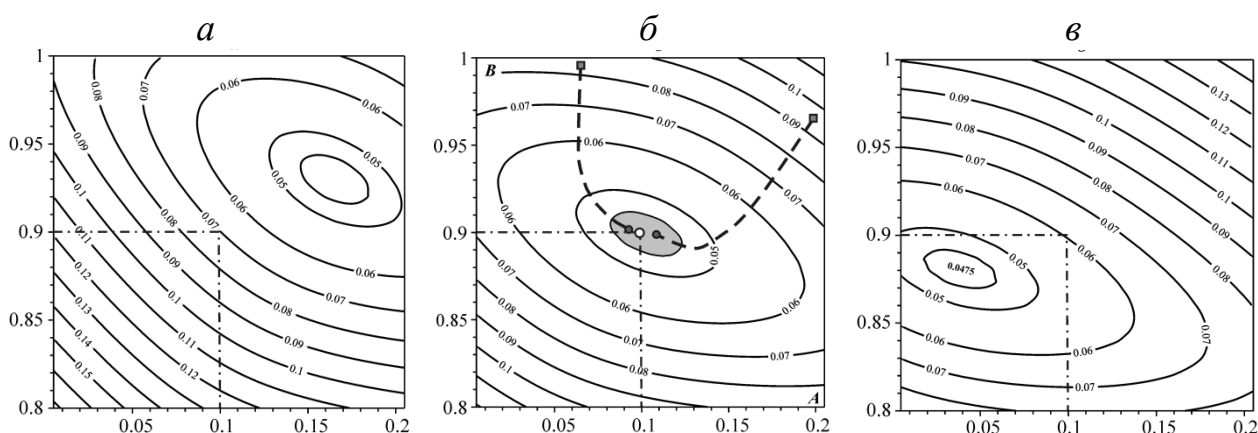


Рис. 4. Линии уровня целевой функции в различных сечениях при $\alpha = 0.4$

По результатам численных экспериментов установлено, что для однозначной разрешимости обратной задачи необходимо регистрировать поверхностные смещения как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Данный подход при наличии высокоточной системы регистрации смещений дневной поверхности дает возможность осуществлять мониторинг поля давления в субгоризонтальных пластах при разработке меторождений углеводородов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Akcin H., Degucci T., Kutoglu H. S. Monitoring Mining Induced Subsidence Using GPS and InSAR, Proc. XXIII FIG Congress, Munich, Germany, 2006, October 8–13.
2. Henry E., Mayer C., Rott H. Mapping Mining-Induced Subsidence from Space in a Hard Rock Mine: Example of SAR Interferometry Application at Kiruna Mine, CIM Bulletin, 2004, Vol. 97, No. 1083.
3. Carlo J., Castelletto N., Ferronato M. et al. A Geomechanical Transversely Isotropic Model of the Po River Basin Using PSInSAR Derived Horizontal Displacement, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, Vol. 51.
4. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971.

5. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Мирошниченко Н. А. Определение деформационно-прочностных характеристик закладочного массива при ведении очистных работ на основе решения обратных задач // ФТПРПИ. – 2012. – № 4. – С. 29–35.

6. Назаров Л. А., Назарова Л. А., Карчевский А. Л., Панов А. В. Оценка напряжений и деформационных свойств породных массивов на основе решения обратной задачи по данным измерений смещений на свободных границах // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 102–109.

7. Карчевский А. Л. Численное решение одномерной обратной задачи для системы упругости // ДАН. – 2000. – Т. 375. – № 2. – С. 235.

© Н. А. Мирошниченко, А. В. Панов, 2014

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИБКОГО ЭЛЕМЕНТА АНКЕРА С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

Станислав Борисович Стажевский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией повышения устойчивости оснований, тел. (383)217-07-63, e-mail: gmmlab@misdnsc.ru

Арестакес Арамович Крамаджян

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории повышения устойчивости оснований, тел. (383)217-01-71, e-mail: gmmlab@misdnsc.ru

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 повышения устойчивости оснований, тел. (383)217-07-38, e-mail: gmmlab@misdnsc.ru

Рассматривается проявляющийся при охвате опоры гибким протяженным элементом эффект, описываемый формулой Эйлера. Подтверждена реализация и выявлены особенности его проявления при взаимодействии гибкого элемента с деформируемым грунтовым основанием. Доказана возможность существенного повышения несущей способности анкеров с гибким тяговым элементом (тросом, лентой, тонким стержнем и т.п.) за счет использования указанного эффекта.

Ключевые слова: грунтовый анкер, гибкая тяга, сила трения, выдергивающая сила, угол охвата, несущая способность.

FEATURES OF GROUND ANCHOR FLEXIBLE ELEMENT INTERACTION WITH SOIL BASE

Stanislav B. Stazhevsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Laboratory for Stabilization of Understructures, tel. (383)217-07-63, e-mail: gmmlab@misdnsc.ru

Arestakes A. Kramadzhyan

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Laboratory for Stabilization of Understructures, tel. (383)217-01-71, e-mail: gmmlab@misdnsc.ru

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, tel. (383)217-07-38, e-mail: gmmlab@misdnsc.ru

The effect described by Euler's formula was studied in the field. A lengthy flexible element enveloping a soil support was loaded with external tension forces. It was found that the pullout force exceeded the holding force due to the friction force developed between the element and soil.

Thus, realization of the effect in the conditions of a soil base was confirmed. The peculiarities of the effect manifestation in a natural soil base have been revealed. It was proved that bearing capacity of ground anchors having flexible tendon (rope, belt, thin rod and the like) could be considerably increased at the expense of the effect.

Key words: ground anchor, flexible tendon, friction force, pullout force, enveloping angle, bearing capacity.

В ИГД СО РАН разработан способ сооружения грунтового анкера с гибкой тягой (трос, лента, цепь, тонкий стержень и т.п.) [1], позволяющий существенно повысить несущую способность устройства. Суть решения состоит в использовании реализующегося при взаимодействии гибкого элемента с охватываемой опорой эффекта, который описывается формулой Эйлера [2]:

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

где F – сила натяжения, приложенная к одному из концов тяги; P – удерживающая сила на другом его конце; e – основание натурального логарифма; α – угол охвата тягой основания; f – коэффициент трения между тягой и опорой. Согласно (1) при указанных условиях сила натяжения F экспоненциально возрастает с увеличением угла охвата α .

В работе [3] рассмотрены результаты лабораторных исследований «эйлеровского» эффекта в приложении к грунтовым анкерам. Ниже представлены результаты исследований этого вопроса в натурных условиях.

Исследования проводились на полигоне «Зеленая горка» ИГД СО РАН. Характеристики грунта экспериментальной площадки, залегающего ниже почвенного слоя, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики рабочего слоя грунта
в районе экспериментальной площадки

Краткая характеристика грунта	Мощность, м	Глубина залегания h , м	Сцепление C , МПа	Угол φ внутреннего трения, град	Коэффициент водонасыщения S_r , %
Суглинок легкий пылеватый, супесь песчаная слабая	2,4 – 3,5	0,3 – 1,2	0,020 – 0,022	23 – 30	0,8

Состоит площадка из котлована 1 размерами в плане 500×250 см и глубиной ~ 150 см, такой же глубины параллельной ему траншеи 2 размерами 500×100 см, и целика 3 между ними шириной 400 см (рис. 1).

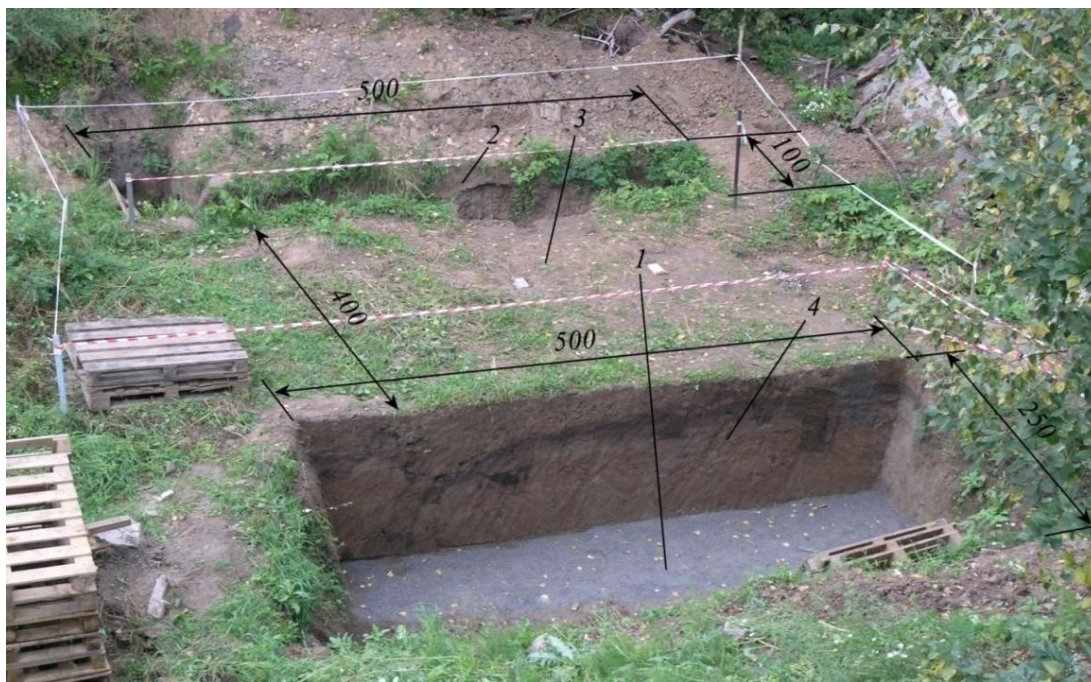


Рис. 1. Площадка полигона:

1 – котлован; 2 – траншея; 3 – целик; 4 – борт целика

Для выяснения особенностей развития эйлеровского эффекта были проведены опыты, которые в целом воспроизвели те, что были реализованы в лабораторных экспериментах с гибкой тягой [3]. Отличались полевые исследования от последних тем, что проводились в грунтовом с повышенной влажностью целике 3 естественного сложения, гибкая тяга в ситуации с углом охвата $\alpha = 180^\circ$ устанавливалась и нагружалась не в вертикальной, а горизонтальной плоскости.

Схема на рис. 2а иллюстрирует общую ситуацию на экспериментальной площадке при проведении опытов; фотография на рисунке 2б – котлован 1 площадки, в который выходят концы U-образного, нагружаемого силами P , F стального троса 2. Активный его конец пропущен через опорную плиту 3, домкрат 4 марки ДП10Г254 и закреплен на нем захватом 5. Домкрат соединен шлангами с ручным гидравлическим насосом 6 марки НРГ-7080Р, который оборудован манометром 7 для контроля усилия F , прикладываемого к активной ветви троса 2.

Для создания U-образной петли 2 использовался трос диаметром 10 мм. Протягивали его от домкрата 4, находившегося в котловане 1, в траншею 8 и обратно через горизонтальные параллельные между собой проложенные на расстоянии друг от друга 150 см в целике 9 скважины 10, 10' диаметром 65 мм. Пройдены они были пневмопробойником ДЖЛ-974. Конец пассивной ветви троса 2 крепили к динамометру 11 растяжения DOP-3-50Н (предел измерений 5-50 кН), оснащенного цифровым индикатором 12 марки R320. С другой стороны к динамометру присоединяли тягу 13 анкера, пята 14 которого жестко фиксировалась в противоположном от рабочего борту котлована 1.

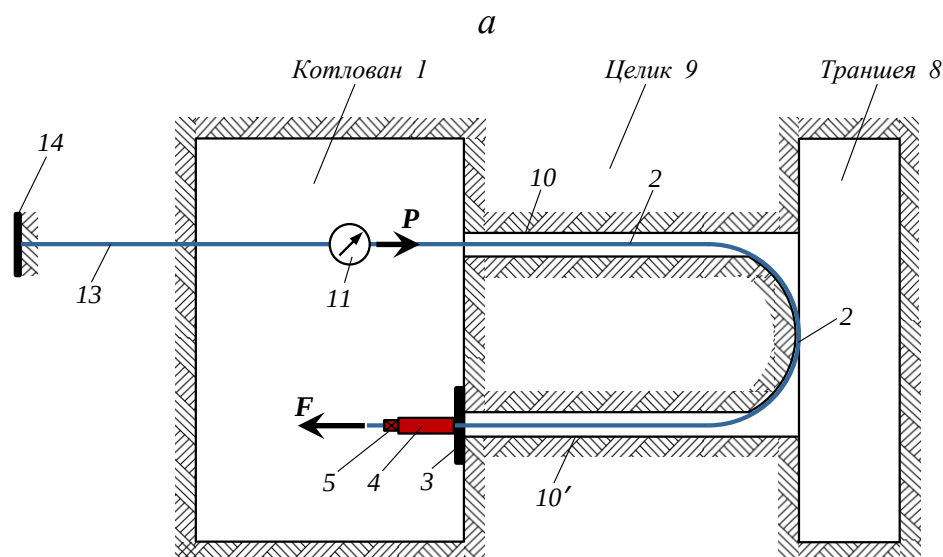


Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) нагружения U-образного троса:
 1 – котлован; 2 – трос; 3 – опорная плита; 4 – домкрат; 5 – зажим троса; 6 – насос;
 7 – манометр; 8 – траншея; 9 – целик; 10, 10' – скважины; 11 – динамометр;
 12 – цифровой индикатор; 13, 14 – соответственно, тяга и пята «мертвого» анкера

Основной целью экспериментов с U-образной гибкой тягой являлось определение коэффициента $K = F/P$, характеризующего эффективность работы эйлеровского эффекта в условиях слабого грунтового основания площадки. Натяжение системы посредством домкрата велось до значения $F^* \approx 30$ кН.

Решению тех же задач были подчинены опыты с L -образным тросом, натяжение которого осуществлялось в вертикальной плоскости. При этом угол α охвата тросом грунтовой опоры был равен 90° .

Основные результаты исследования особенностей развития эйлеровского эффекта при взаимодействии гибкого тягового элемента со слабыми грунтовыми опорами, огибаемыми им на углах 90 и 180° , представлены на рис. 3. Видно, что зависимость $F = f(P)$ для грунтового основания, как и для песка в лабораторном эксперименте [3] фактически имеет линейный характер. Из рисунка следует, что углы наклона θ_1 , θ_2 графиков 1, 2 соответственно равны ~ 56 и 67° , а вкладом F_r эффекта «резания» в величину сопротивления тросов выдергиванию из основания можно пренебречь. Отсюда с точностью, достаточной для практики, коэффициент $K = F/P$ составляет для тросов с углами охвата α , равными 90 и 180° , соответственно 1,5 и 2,5.

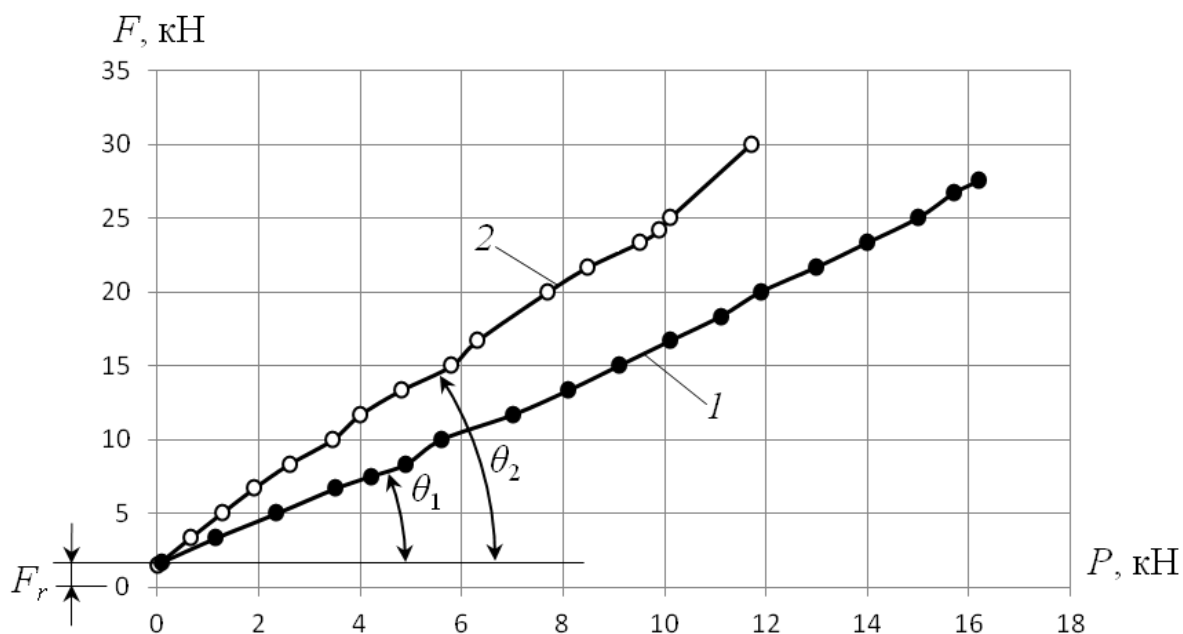


Рис. 3. Зависимость выдергивающей силы F от удерживающей P :
при углах охвата α равных 90° (1) и 180° (2)

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при взаимодействии криволинейной гибкой тяги анкера с грунтом естественного сложения эйлеровский эффект проявляется столь же отчетливо, как и в случае жесткой цилиндрической опоры. Результатом его реализации становится восприятие анкерной тягой части усилия выдергивания, что ведет к росту несущей способности анкера в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стажевский С.Б., Крамаджян А.А., Русин Е.П., Хан Г.Н. Способ сооружения грунтового анкера. – Патент РФ № 2457293. – БИ № 21. – 2012.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В двух томах. Т. I: Статика и кинематика. – 4-е изд., исправл. – М.: Наука, 1985. – 240 с.
3. Стажевский С.Б., Крамаджян А.А., Русин Е.П. О нетрадиционном подходе к повышению несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 3. – С. 35–40.

© С. Б. Стажевский, А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, 2014

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИБРОТЕХНИКИ НА КАРЬЕРАХ

Самуил Яковлевич Левенсон

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией вибротехники, тел. (383)217-06-76, 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)217-06-12, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Владимир Михайлович Усольцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)220-14-98

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)217-05-19

Предложены пути интенсификации отвальных работ с использованием горно-транспортного оборудования повышенной мощности. Рассмотрена возможность создания принципиально нового горного оборудования на основе вибрационных транспортирующих машин нового поколения.

Ключевые слова: глубокие карьеры, интенсификация, перегрузочный узел, вибрационный питатель, отвалообразователь.

USE PERSPECTIVENESS OF VIBRATION MACHINES IN OPEN PIT MINES

Samuil Ya. Levenson

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Head of Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)217-06-76, e-mail: lev@misd.nsc.ru

Lyudmila I. Gendlina

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)217-06-12, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Vladimir M. Usoltsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)220-14-98

Aleksey V. Morozov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Vibratory Equipment Laboratory, tel. (383)217-05-19

It is suggested to stimulate dumping by using higher capacity heavy-duty mining and haulage machinery. The authors discuss feasibility of designing of brand new mining equipment based on vibratory conveying machines of new generation.

Key words: deep open pit mines, stimulation, transfer points, vibration feeder, overburden spreader.

По мере увеличения глубины карьеров прогрессивно увеличиваются объемы вскрышных пород. В этих условиях интенсификация вскрышных работ возможна за счет внедрения горно-транспортного оборудования повышенной мощности и грузоподъемности.

При доставке вскрышных пород с нижних горизонтов месторождений целесообразно использование экскаваторов-мехлопат с объемом ковша 12,5...30,0 м³ и автосамосвалов грузоподъемностью не менее 110...220 тонн. [1].

Однако возможность повышения интенсивности отвальных работ за счет использования мощного оборудования (автосамосвалов и бульдозеров, имеющих значительную собственную массу) ограничена, так как прочность и устойчивость отвального массива в большинстве случаев не позволяют обеспечить его безопасную эксплуатацию при формировании породных отвалов.

Возможны два пути устранения сложившегося противоречия, связанного с интенсификацией транспортных работ на карьерах за счет роста грузоподъемности автосамосвалов.

1. Перегрузка вскрышных пород из автомобильного в другие (более безопасные) виды транспорта – железнодорожный или конвейерный.

2. Создание безопасных условий эксплуатации большегрузных автосамосвалов на породных отвалах.

Обе задачи позволяет решить принципиально новое оборудование: перегрузочные узлы с вибровыпуском и вибрационные отвалообразователи.

Вибрационные машины различного назначения применяются в ряде отраслей промышленности, в том числе – горнодобывающей.

В ИГД СО РАН накоплен опыт исследования и разработки вибрационных питателей с рабочим органом, совершающим волновые колебания.

В этих машинах исключена система упругих связей между рабочим органом, выполненным в виде сравнительно тонкого металлического листа, и основанием, что позволяет использовать их под любыми завалами горной массы, в условиях значительных динамических нагрузок, изменяющихся по величине в широком диапазоне.

Для выпуска сыпучих материалов из емкостей большого объема был создан вибропитатель «Волна–8». В результате промышленных испытаний экспериментальных образцов этих питателей подтверждена возможность применения бункеров с вибрационным выпуском в составе бункерно–экскаваторных перегрузочных пунктов для погрузки горной массы в средства железнодорожного транспорта, а также для ее перегрузки из автомобильного в железнодорожный транспорт.

Для перемещения вскрышных пород разработан вибрационный питатель ВТУ 6, упругий рабочий орган которого оборудован двумя самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями.

Вибрационный отвалообразователь представляет собой конструкцию из четырех вибрационных транспортирующих устройств (питателей ВТУ-6), установленных параллельно под углом 15° к горизонту на раме с бортами и упором для колес автосамосвалов. Автосамосвал разгружается непосредственно на виброплощадку отвалообразователя, затем порода перемещается виброустройствами под откос отвала.

На рис. 1 представлен фрагмент промышленных испытаний вибрационного отвалообразователя.



Рис. 1. Фрагмент промышленных испытаний вибрационного отвалообразователя

Широкое распространение вибротехники на открытых горных работах, где необходимы транспортирующие устройства высокой производительности и грузоподъемности [2], долгие годы сдерживалось из-за отсутствия на мировом рынке достаточно простых и надежных в эксплуатации инерционных вибровозбудителей (мотор-вибраторов), генерирующих вынуждающую силу в интервале от 40 до 100 кН. Устройства, оборудованные вибровозбудителями с приводом от внешнего электродвигателя, имели недостаточную надежность из-за наличия механической передачи (клиноременной, карданной и др.).

В настоящее время производители вибрационного оборудования в России, Италии, Германии и других странах значительно обновили ассортимент и предлагают вибровозбудители с вынуждающей силой до 100 кН в широком диапазоне частот с возможностью их плавного изменения внешними и встроенными частотными преобразователями.

Эта благоприятная ситуация позволяет исследователям и разработчикам создавать принципиально новое горное оборудование на основе современных вибрационных транспортирующих машин.

Результаты исследований и промышленных испытаний оборудования были использованы при создании вибрационного отвалообразователя, соответствующего грузоподъемности современных автосамосвалов и требованиям производства. Новая технология отвалообразования с использованием вибротехники заключается в следующем: отвалообразователь размещается на предварительно спланированной горизонтальной площадке так, чтобы разгрузочный участок грузонесущего органа располагался за кромкой откоса отвального яруса. При этом нет необходимости в предохранительном породном барьере. Длина отвалообразователя обеспечивает размещение места разгрузки автосамосвала за призмой возможного обрушения. Необходимое расстояние от кромки откоса отвального яруса до места разгрузки устанавливается в соответствии с требованиями безопасности ведения работ.

Самоходный гидрофицированный вибрационный отвалообразователь для реализации предложенной технологии (рис. 2) состоит из опорной рамы 1, грузонесущего органа 2 с вибрационными транспортирующими устройствами и механизма передвижения 3.

Отвалообразователь при помощи механизма передвижения устанавливается у кромки откоса отвального яруса на спланированной горизонтальной площадке. Автосамосвал 4 (рис. 2а) задним ходом приближается к нему до контакта колес с упорами, расположенными внутри грузонесущего органа, и производится разгрузка кузова. После отхода самосвала грузонесущий орган при помощи гидроцилиндров 5 и 6 поворачивается относительно опорной рамы в положение разгрузки (рис. 2б), включаются вибрационные транспортирующие устройства, и порода перемещается под откос отвала.

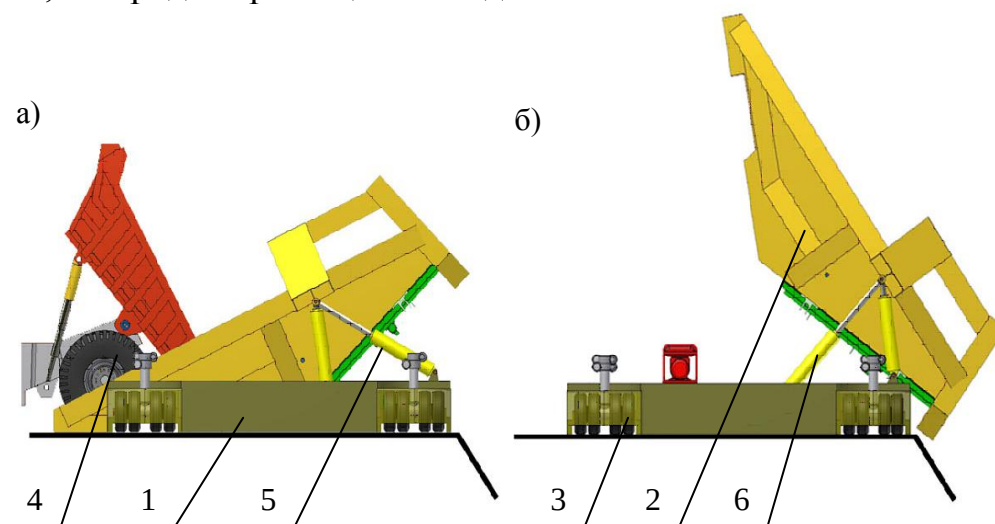


Рис. 2. Схема работы вибрационного отвалообразователя:

- а – разгрузка самосвала; б – разгрузка отвалообразователя;
1 – опорная рама; 2 – грузонесущий орган; 3 – механизм передвижения;
4 – автосамосвал; 5, 6 – гидроцилиндры

Затем грузонесущий орган возвращается в исходное положение, и осуществляется его загрузка следующим автосамосвалом. Передвижение отвалообразователя на другую стоянку вдоль кромки отвальной емкости производится после заполнения участка под отвальной консолью (рис. 3).

В настоящее время изготовлен экспериментальный вибрационный отвалообразователь (рис. 4). Результаты его полигонных испытаний подтвердили возможность использования предложенной конструктивной схемы при создании отвалообразователей для работы с автосамосвалами грузоподъемностью до 200...300 тонн.

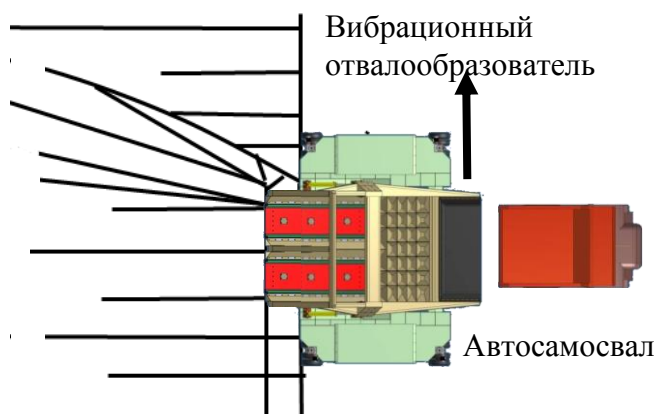


Рис. 3. Схема размещения оборудования на рабочей площадке отвала



Рис. 4. Общий вид экспериментального вибрационного отвалообразователя

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Заключение

Использование принципиально нового горного оборудования – перегрузочных узлов в виде бункеров большой емкости с вибровыпуском и самоходных отвалообразователей с принудительным вибрационным перемещением породы под откос отвала, позволяет формировать эффективные транспортные системы при вскрытии глубоких горизонтов карьеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Е.И., Кортелев О.Б., Норри В.К. и др. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах // Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000.
2. Юдин А.В., Мальцев В.А., Косолапов А.Н. Тяжелые вибрационные питатели и питатели-грохоты для горных перегрузочных систем // Екатеринбург, 2009, 402 с.

© С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, В. М. Усольцев, А. В. Морозов, 2014

БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГОРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Илья Олегович Шахторин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (+7)923-399-3268, e-mail: Scorpion22@bk.ru

Приведен обзор современного бурового инструмента для горных и строительных работ. Описаны требования, предъявляемые к буровому инструменту, а также основные направления его развития.

Ключевые слова: бурение, скважина, буровой инструмент, пневмоударник, долото, буровая коронка.

DRILLING TOOLS FOR MINING AND CONSTRUCTION

Ilya O. Shakhtorin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, postgraduate student, tel. (+7)923-399-3268, e-mail: Scorpion22@bk.ru

The article reviews modern drilling tools used in mining and construction, the drilling tool requirement and the basic trends.

Key words: drilling, borehole, drilling tools, air hammer, drilling bit, crown bit.

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. Данные машины находят широкое применение в горной и строительной отраслях. Работают пневмоударники совместно с буровыми долотами самых различных конструкций, предназначенных для бурения пород различной крепости и трещиноватости. Каждый производитель стремится изготовить надежные и долговечные буровые долота для своих пневмоударников. К сожалению, на сегодняшний день не существует единой стандартизации пневмоударников и буровых долот. Пневмоударники одной фирмы практически несовместимы с долотами другой. Особенно это заметно при сравнении отечественной и зарубежной продукции.

Создание пневмоударников и буровых долот с единой системой соединения позволит значительно повысить универсальность бурового оборудования, упростит замену изношенных долот. У потребителей будет возможность на свое усмотрение комбинировать буровое оборудование. На пример, использовать отечественный пневмоударник с долотом зарубежной фирмы.

Некоторые зарубежные фирмы, такие как Atlas Copco [1], Buromax [2], Desco Drilling [3] уже перешли на производство пневмоударников и буровых долот с единой системой крепления. Данные пневмоударники предназначены для ударно-вращательного бурения в породах и рудах при давлении воздуха от

1 до 2,5 МПа на буровых станках. Конструкция данных пневмоударников изображена на рис. 1. Технические характеристики пневмоударников в соответствии с данными фирм представлены в табл. 1.

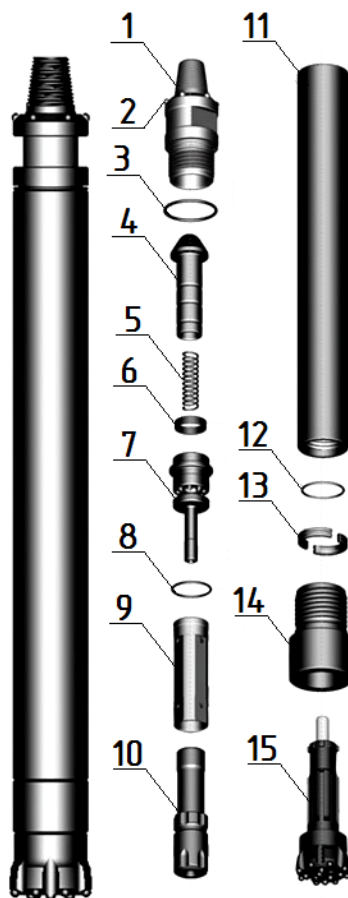


Рис. 1. Конструкция погружных пневмоударников зарубежного производства:

1 – резьбовая часть; 2 – верхняя гайка; 3 – кольцо; 4 – клапан; 5 – пружина; 6 – кольцо; 7 – воздушный клапан; 8 – кольцо; 9 – внутренний цилиндр; 10 – поршень; 11 – корпус; 12 – кольцо; 13 – полукольца; 14 – нижняя гайка; 15 – буровая коронка

Таблица 1

Технические характеристики пневмоударников
зарубежного производства

Производитель	Atlas Copco		Buromax		Descos Drilling
Модель	COP 34	COP 44	COP 44 STD	RH550R-4	3.5 дюйма
Диаметры коронок, мм	92 ÷ 105	110 ÷ 125	105 ÷ 130	115 ÷ 133	105 ÷ 130
Наружный диаметр, мм	83,5	98	89	99	85
Длина, мм	954	958	890	931	870
Масса, кг	27	38	40	40	24

Бурение взрывных скважин на открытых и подземных горных разработках является важным, весьма трудоемким и дорогостоящим производственным процессом. Удельный вес буровых работ в общей себестоимости добычи полезного ископаемого достигает 30% и более. Все это обуславливает большую народнохозяйственную значимость вопросов совершенствования техники и технологии бурения взрывных скважин. Развитие горной промышленности требует увеличения производительности бурения в 2-4 раза [4]. Для этого необходимо совершенствование механических способов бурения и изыскание новых. Совершенствование бурильных машин осуществляется за счет увеличения параметров нагрузки на инструмент, механизации и автоматизации вспомогательных операций. Это свидетельствует о необходимости совершенствования бурового оборудования, повышения производительности и надежности.

По результатам патентного поиска и информации, полученной из каталогов производителей, можно определить основные направления развития современных погружных пневмоударников:

1. Выхлоп на забой. Номера патентов: 2211908, 2224868, 76062. Классы патентов: E21B4/14, E02B8/08.

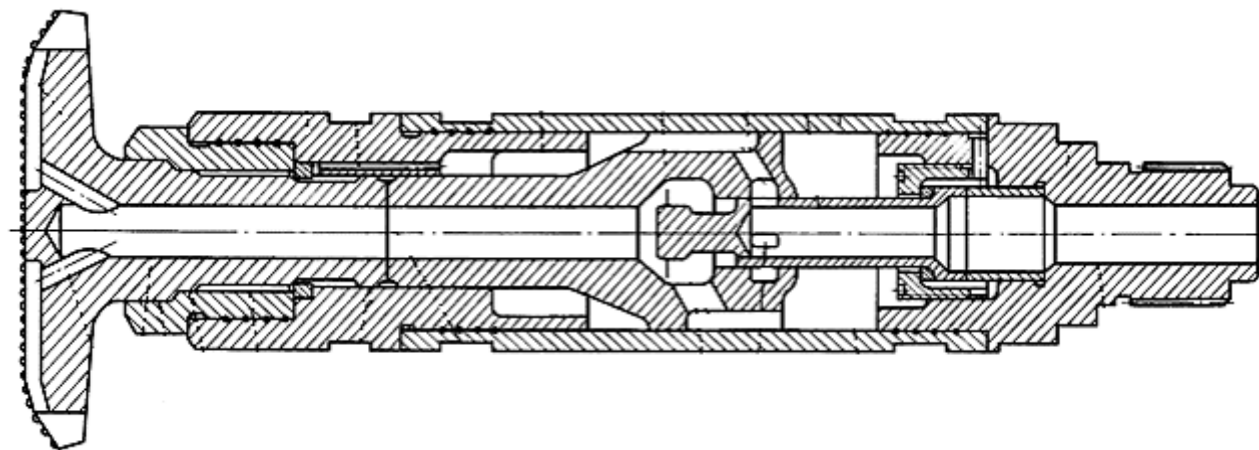


Рис. 2. Пневмоударник с выхлопом на забой

2. Закрытый тип. Номера патентов: 2211907, 2252996, 16376. Классы патентов: E21B4/14, E21F13/04.

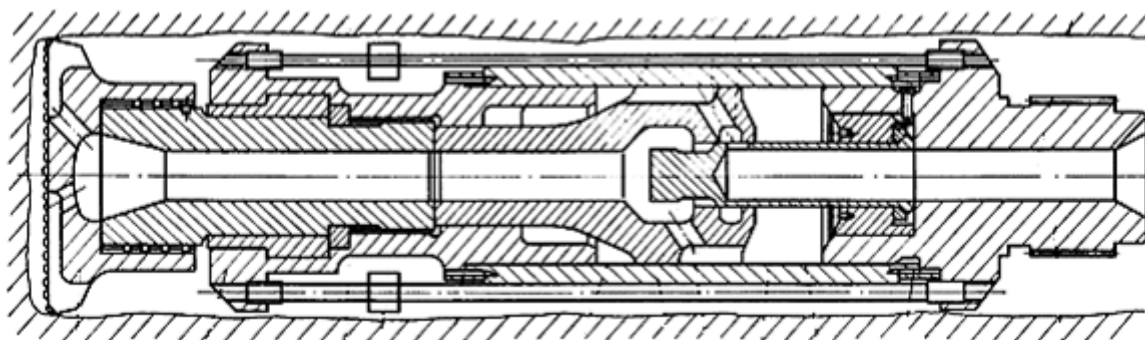


Рис. 3. Пневмоударник закрытого типа

3. Высокое давление. Номера патентов: 2166055, 2186925, 2209914. Классы патентов: E21B4/14, E21B1/38.

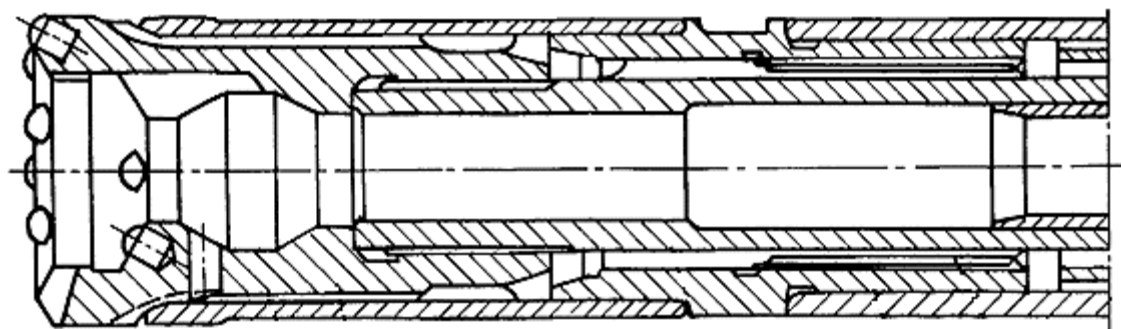


Рис. 4. Пневмоударник для работы на высоком давлении энергоносителя

4. Составной инструмент. Номера патентов: 2343266, 2086748, 70540. Классы патентов: E21B4/14, E21B10/46.

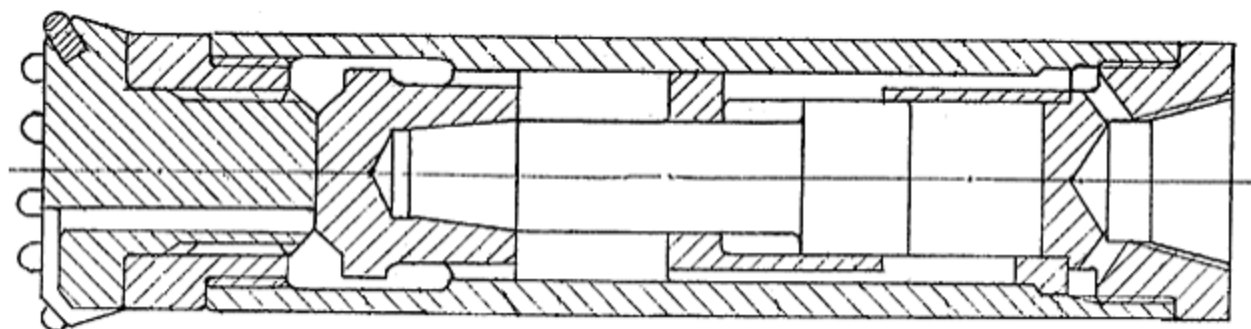


Рис. 5. Пневмоударник с составным буровым инструментом

5. Шлицевый штыревой инструмент. Номера патентов: 2311521, 2055138, 94616. Классы патентов: E21B4/14, E21C3/24.

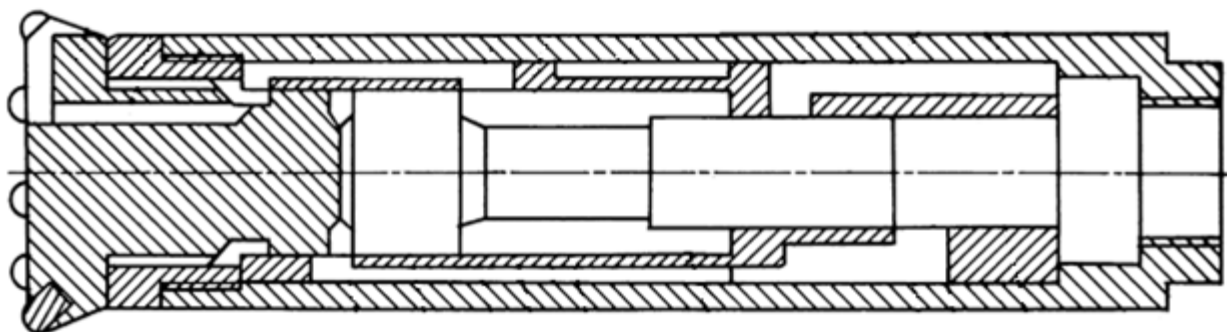


Рис. 6. Пневмоударник с шлицевым штыревым буровым инструментом

С учетом вышеизложенной информации, в ИГД СО РАН была разработана новая конструкция пневмоударника малого диаметра АШ43, предназначенного для работы на высоком давлении энергоносителя. Главной особенностью АШ43 является простота конструкции и постоянное давление в камере обратного хода. Данный пневмоударник при высокой энергии удара имеет сравнительно низкий расход сжатого воздуха, что свидетельствует о высокой эффективности данной схемы.

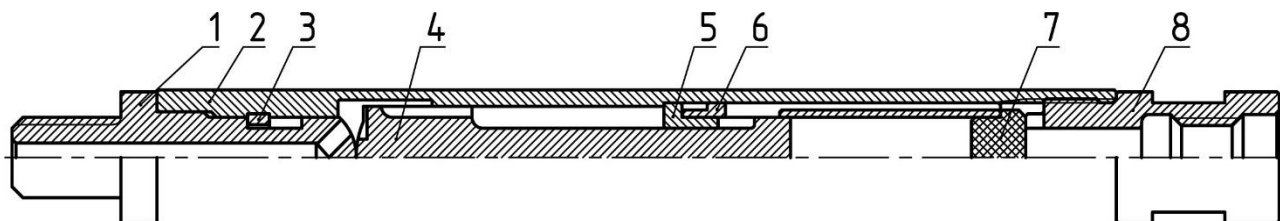


Рис. 7. Конструкция пневмоударника АШ43:

1 – скалка; 2 – корпус; 3 – кольцо пружинное; 4 – ударник;
5 – втулка разрезная; 6 – гильза; 7 – пробка; 8 – переходник

Для решения проблемы несовместимости буровых долот и пневмоударников разных производителей необходимо ввести общие стандартизированные размеры и тип соединения бурового оборудования, например, шлицевый. Данное решение проблемы возможно, но маловероятно, так как производителям бурового оборудования будет проблематично достичь общей договоренности. Или использовать дополнительные переходники, через которые будет возможно соединить, например, шлицевые зарубежные долота с шпоночным соединением отечественного пневмоударника. Данные переходники могут быть изготовлены любым производителем бурового оборудования, желающим повысить универсальность своей продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каталог продукции компании Atlas Copco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.Atlascopco.com>.
2. Каталог продукции компании Buromax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.Buromax.ru>.
3. Каталог продукции компании Desco drilling [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.Desco-drilling.com>.
4. Шахторин И. О. Современные погружные пневмоударники для бурения скважин диаметром до 100 мм // Сборник трудов Всероссийской научной конференции молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена», Том 3. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013 – С. 214 – 221.

© И. О. Шахторин, 2014

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЫЕМКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ С ПОРОДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

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 и технологических импульсных машин, тел. (383)217-09-63, e-mail: LabVN@yandex.ru

Рассмотрена принципиальная возможность применения комбинированного способа разрушения (разрушение ударом и резанием) при выемке угольных пластов с породными включениями.

Ключевые слова: удар, резание, разрушение, уголь, порода, пласт, угольный комбайн, выемочная машина.

COMBINED BREAKING TECHNOLOGY FOR COAL WITH ROCK INTERCALATIONS

Victor N. Labutin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, tel. (383)217-0963, e-mail: LabVN@yandex.ru

The author analyzes applicability of the breaking technology that combines impact fracture and cutting in extraction of coal beds with rock intercalations.

Key words: impact, cutting, breaking, coal, rock, coal shearer, winning machine.

Среди традиционных способов разрушения углей и горных пород наибольшее распространение получили буровзрывной и механический (резание и ударное разрушение). Изыскание новых физических методов разрушения не дали пока серьезных положительных результатов в горной промышленности, поэтому совершенствование традиционных способов на сегодняшний день продолжает оставаться актуальной задачей.

Буровзрывной способ, наряду с главным своим преимуществом - универсальностью, имеет ряд серьезных недостатков. Несмотря на проводимую в последнее время его модернизацию: использования новых ВВ, совершенствования средств бурения, схем взрывания и т.п., повышающих его технологичность и безопасность, этот способ продолжает вызывать беспокойство за последствия его широкого применения. Ниже рассматривается оценка принципиальной возможности применения комбинированного способа, сочетающего известные преимущества резания и ударного разрушения.

Области эффективного применения способов разрушения определяются физико-механическими свойствами и прежде всего сопротивляемостью разрушаемого материала. На рис. 1 представлены осредненные зависимости удельной энергоемкости разрушения от прочности горных пород (1 - резание; 2 - ударное; 3 - буровзрывное разрушение), полученные на основе анализа работы

исполнительных органов горных машин в различных горно-геологических условиях. Согласно графику, удельная энергоемкость ударного способа находится на уровне наименее энергоемкого буровзрывного и значительно ниже разрушения резанием. Причем с увеличением прочности породы относительная эффективность ударного разрушения по сравнению с резанием повышается.

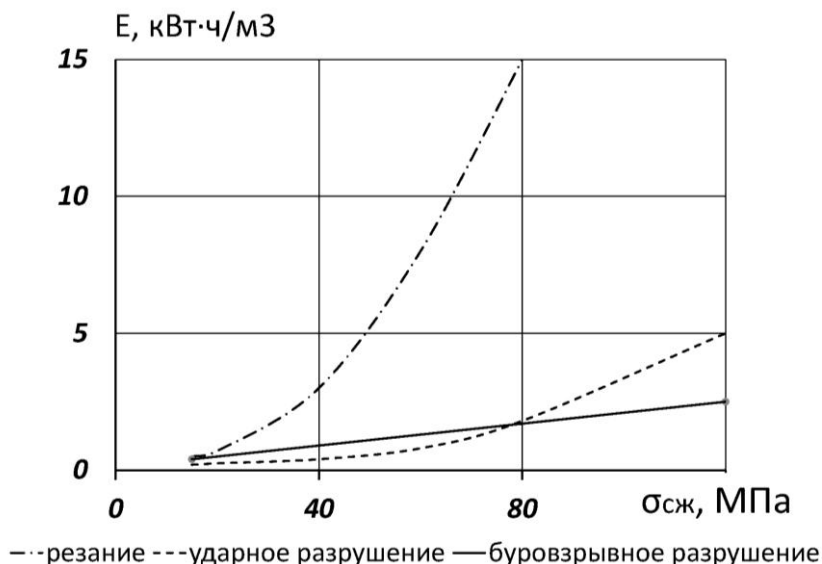


Рис. 1. Зависимость удельной энергоемкости разрушения от прочности горной породы

В современной добыче угля подземным способом доминирует единый подход к комплексной механизации на основе использования узкозахватной комбайновой и струговой технологий, ориентированных на реализацию в стабильных качественных горно-геологических условиях. Однако прочность отдельных структурных элементов разрушаемого угольного массива может меняться в широких пределах: от пластов простого строения, весьма слабых и хрупких с сопротивляемостью угля резанию до 120 кН/м, которые могут эффективно разрушаться угольными многолезцовыми исполнительными органами, до участков с местными замещениями пласта частично или полностью боковыми породами с сопротивляемостью резанию 400÷1000 кН/м, которые могут эффективно разрушаться только ударными исполнительными органами. На таких участках для переводов комплексов через участки нарушений применяют буровзрывную технологию разрушения пластов с присечкой боковых пород.

Известно, что для снижения энергозатрат на разрушение угля и уменьшения выхода мелких фракций необходимо повышать толщину стружки. Об этом свидетельствуют осредненные зависимости удельной энергоемкости разрушения угля (рис. 2) и выхода продуктов разрушения (рис.3) от толщины стружки, составленные на основании экспериментальных данных [1-5]. Перевод современных шнековых комбайнов на режим работы с большими толщинами стружек приводит к резкому возрастанию динамических нагрузок и снижению на-

дежности машин, а поддержание постоянной толщины стружки невозможно вследствие кинематики роторных исполнительных органов. Поэтому зона реальных максимальных значений толщин стружки современных выемочных машин с роторными исполнительными органами составляет 50-60 мм [1], что является главным фактором, определяющим фракционный состав извлекаемого из недр угля. Так, выход штыба (класс 0-6) по отношению к общему объему добычи по данным [5] для узкозахватных комбайнов находится в пределах 35÷45%. При использовании ударного способа разрушения за счет увеличения толщины стружки можно в 2-4 раза снизить выход продукта разрушения мелкой фракции (рис. 3).

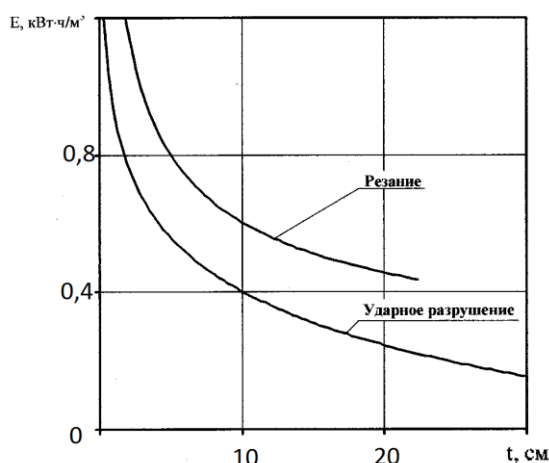


Рис. 2. Зависимость удельной энергоемкости разрушения угля от толщины стружки

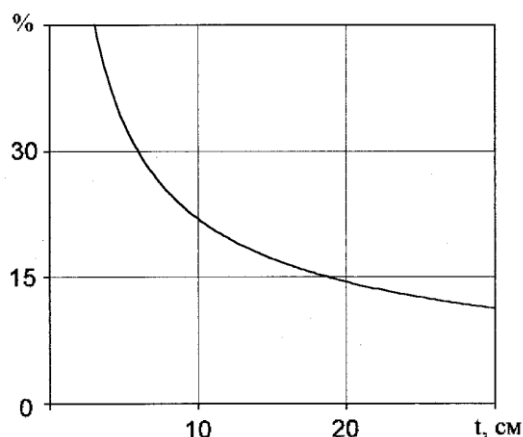


Рис. 3. Зависимость выхода продукта разрушения класса (0-25 мм) от толщины стружки

В связи с этим, с целью повышения эффективности процесса добычи угля из пластов сложного строения, содержащих породные пропластки и твердые включения, предлагается использовать комбинированный способ разрушения забоя, сочетающий обычное резание и ударное разрушение, с помощью которого можно избирательно, в рациональных режимах производить разрушение резанием или ударом отдельных элементов угольного забоя в зависимости от их прочности. При этом достигается раздельная, селективная выемка породных прослоек и угля. Схема выемочной машины флангового действия, оснащенной шнековым и ударным исполнительными органами, представлена на рис.4. Она состоит из корпуса 1, в котором размещены приводные устройства исполнительных органов и подачи комбайна, поворотных редукторов-рукоятей 2, с помощью которых исполнительные органы меняют свое положение по мощности пласта, шнека 3, оснащенного резцами. Ударные устройства 4 закреплены на поворотной плите 5 с помощью телескопической стойки 6 и шарнира 7. Количество ударных устройств выбирается в зависимости от мощности угольного

пласта и породных прослоек. Перемещается выемочная машина по ставу конвейера 8.

Во избежание нежелательного контакта резцов шнекового органа с породой взаимное расположение исполнительных органов должно быть таким, чтобы траектории их движения вдоль забоя, обозначенные на рис. 4 А и В, проходили друг от друга на расстоянии не менее толщины разрушаемого слоя Н, снимаемого ударным инструментом.

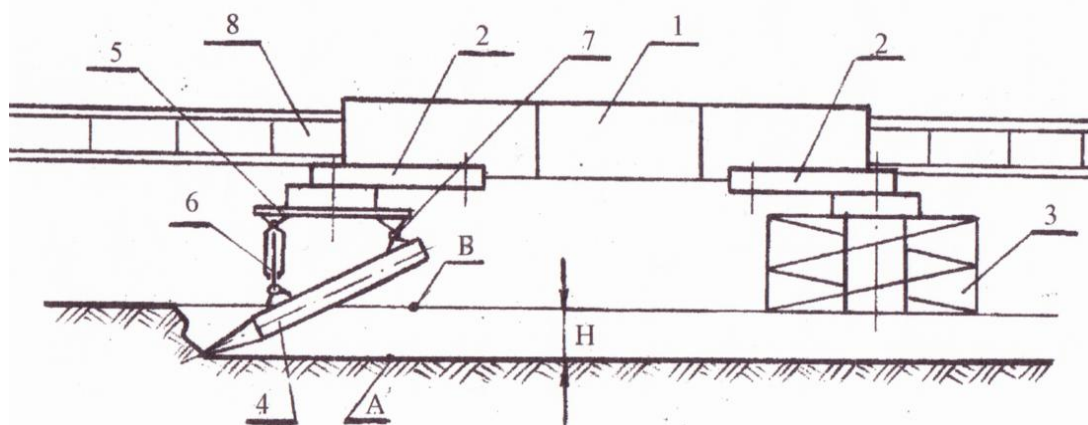


Рис. 4. Схема компоновки комбайна с режущим и ударным исполнительными органами

Работа выемочной машины осуществляется следующим образом. Ударный исполнительный орган 4 с помощью поворотного редуктора-рукояти 2 и плиты 5 устанавливается в плоскости забоя для разрушения породного прослойка и фиксируется в исходном положении. С помощью телескопической стойки 6 выбирается необходимый для зарубки угол атаки, включается шнековый орган 3 и механизм подачи, перемещающий выемочную машину вдоль лавы. В конце лавы, после выхода исполнительных органов из забоя, выемочная машина останавливается. Ударные устройства поворачиваются на 180^0 и ориентируются на разрушение очередного прослойка обратным ходом машины, при условии невозможности их разрушить за один проход. После разрушения всех породных прослоек выемочная машина подвигается к забою на величину вынутаго слоя породы Н.

Технология отработки угольных пластов с породными прослойками и твердыми включениями зависит от их количества, толщины и крепости. На примере угольного пласта с одним породным прослойком (см. рис.5) показана технологическая последовательность срезов отдельных участков забоя.

1. Ударный орган вынимает слой породы 1 толщиной Н, а шнек выполняет функцию зачистки почвы и погрузки отбитой горной массы на конвейер.

2. Шнек вынимает слой угля 2 толщиной Н, освобожденный от породы; ударный орган, следуя за шнеком, вынимает очередной слой породы 3.

3. Ударный орган вынимает слой породы 4, шнек – нижнюю пачку угля 5 толщиной $2H$.

4. Шнек вынимает верхнюю пачку угля 6 толщиной $2H$, ударный орган – слой породы 7 толщиной H .

Первые две операции технологического процесса подготовительные, а, начиная с третьей позиции, выемочная машина работает в установившемся режиме. За один цикл работы машины (2 хода вдоль лавы) ударным исполнительным органом вынимается 2 слоя породного прослойка, а шнеком нижняя и верхняя пачки угля. Подвигание забоя за цикл составляет $2H$. В качестве ударного исполнительного органа могут быть использованы пневматические и гидравлические ударные устройства с энергетическими параметрами, обеспечивающими эффективное разрушение породных прослоек и твердых включений.

Энергетические параметры ударных устройств исполнительного органа выемочной машины можно выбрать согласно рекомендациям [7] по «погонной ударной энергии» – энергии, отнесенной к длине лезвия клинового инструмента, необходимой для эффективного разрушения, которая должна быть не ниже $120\text{--}150 \text{ Дж/м}10^{-2}$. Тогда при длине лезвия инструмента 0.15 м энергия единичного удара ударного устройства должна быть не менее 1800 Дж , а частота ударов не ниже 6 с^{-1} .

Технологический цикл работы комплекса с выемочной машиной, оснащенной ударным и режущим исполнительными органами включает в себя два рабочих хода машины вдоль лавы, во время которых производится отбойка породного прослойка (2 стружки толщиной по 0.3 м) ударным исполнительным органом и отбойка угольных пачек толщиной по 0.6 м с одновременной зачисткой кровли и почвы шнековым органом. Концевые операции включают в себя работы, связанные с подготовкой машины к рабочему ходу в обратном направлении (реверсирование и установка исполнительных органов на рабочий ход в забое), а также с

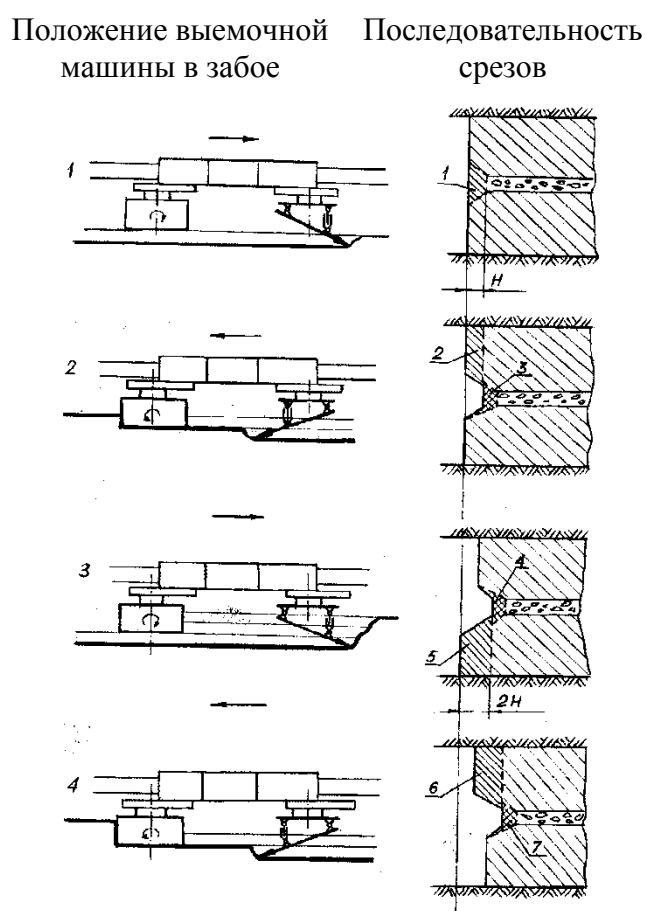


Рис. 5. Схема выемки угольного пласта с породными прослойками выемочной машиной

перемещением скребкового конвейера и крепи на забой. Общее подвигание угольного забоя за один цикл составит 0.6 м.

При принятой скорости подачи 12 м/мин время одного цикла составит - 47 мин, в том числе отбойка породных прослоек и угля - 17 мин; время, затраченное на вспомогательные операции, согласно данным [5] можно принять 30 мин. Техническая производительность выемочной машины при массе отбитого угля за один цикл 156 т составит - 3.3 т/мин. При наличии в угольном пласте несколько породных прослоек для его полной очистки от породы потребуются большее число ходок выемочной машины, соответственно снизится и производительность выемки угля из забоя.

Таким образом, применение комбинированного способа разрушения, сочетающего резание с ударом, позволяет решить проблему выемки угольных пластов с породными прослойками и твердыми включениями, исключив при этом небезопасный и дорогостоящий буровзрывной способ разрушения.

Комбинированный способ позволяет вести процесс выемки угля из забоя в рациональном режиме при минимальных удельных энергозатратах, с производительностью отбойки сопоставимой с выемкой угля средней крепости современными узкозахватными очистными комбайнами, а также сокращает выход штыба угля (класса 0.6 мм) более чем в 2 раза.

Кроме того, комбинированный способ, основанный на поэтапном ударном разрушении крепких породных прослоек с последующим разрушением разупрочненной части забоя резанием может найти применение при добыче неоднородных по строению и прочностным свойствам продуктивных пластов рудных, россыпных, жильных месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Габов В.В. Разработка и теоретическое обоснование модульных комплексов избирательного действия для добычи угля: Автореферат дис...докт. техн. наук/ СПГГИ. – СПб., 1999.- 50с.
2. Кичигин А.Ф., Игнатов С.Н., Лазуткин А.Г., Янцен И.А. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом. – М.: Недра, 1972.-С.20-26.
3. Федулов А.И., Лабутин В.Н. Ударное разрушение угля. – Новосибирск: Наука, 1973.- 125с.
4. Федулов А.И., Иванов Р.А. Ударное разрушение мерзлых грунтов. - Новосибирск: Наука, 1975.- 128с.
5. Солод В.И., Зайков В.И., Первов К.М. Горные машины и автоматизированные комплексы. – М: Недра, 1974.- 502с.
6. Федулов А.И., Лабутин В.Н. Ударное разрушение мерзлых грунтов и горных пород // ФТПРПИ. – 1995. - №5.- С.57-62.
7. Маттис А.Р., Лабутин В.Н., Лысенко Л.Л. Методика определения энергетических параметров привода ударных зубьев ковша активного действия // ФТПРПИ. – 1995. № 5. – С. 62–68.

© В. Н. Лабутин, 2014

ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТЫ УДАРОВ ИСТОЧНИКА СИЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПРОХОДКЕ СКВАЖИНЫ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ

Игорь Владимирович Тищенко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механизации горных работ, тел. (383)217-05-13

Владимир Васильевич Червов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией механизации горных работ, тел. (383)217-02-55, e-mail: chervov@misd.nsc.ru

Алексей Игоревич Горелов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории механизации горных работ, тел. (383)217-05-13

Рассмотрена проблема повышения производительности виброударного воздействия на разрушаемый породный, и уплотняемый грунтовый массивы, за счет увеличения частоты источника силовых импульсов. В работе описаны результаты физического моделирования процесса с использованием дополнительных источников импульсной нагрузки. Обоснована возможность применения комбинированного генератора ударной нагрузки состоящего из двух устройств ударного действия в качестве пути увеличения частоты ударного воздействия.

Ключевые слова: генератор ударного воздействия, импульсная установка, амплитуда ударного импульса, частота ударов, скорость погружения.

INCREASED BLOW FREQUENCY OF POWER PULSE GENERATOR IN SOIL DRILLING

Igor V. Tishchenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Underground Mining Mechanization Laboratory, tel. (383)217-05-13

Vladimir V. Chervov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Underground Mining Mechanization Laboratory, tel. (383)217-02-55, chervov@misd.nsc.ru

Aleksey I. Gorelov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Underground Mining Mechanization Laboratory, tel. (383)217-05-13

The authors discuss potential gain in efficiency of vibration treatment of rock mass subject to destruction or soil mass subject to compaction by means of increasing the power pulse source fre-

quency. The article describes physical modeling of vibration treatment with additional pulse load sources and validates applicability of combination impact generator composed of two percussion devices as the way of increasing the impact treatment frequency.

Key words: impact generator, pulse facility, impact pulse amplitude, impact frequency, penetration rate.

Широкий спектр горнодобывающих, а также строительных операций включают ряд специальных рабочих процессов, в основе которых лежит приложение импульсной нагрузки к рабочему органу инструмента, непосредственно взаимодействующему с разрушаемой или деформируемой горной породой, таких, как погружение в грунт стальных профилей, бестраншейная прокладка коммуникаций (виброударное прокалывание, продавливание). Для их осуществления в настоящее время применяется широкая гамма машин ударного действия, работающих на различных типах энергоносителя, в том числе и сжатом воздухе.

Одним из основных путей интенсификации процессов ударного разрушения горных пород является создание устройств с расширенным частотным диапазоном ударного воздействия при условии обеспечения ими требуемого порогового значения единичного удара, необходимого для преодоления сопротивления разрушаемого массива [1, 2]. В случае виброударного погружения стальных профилей в грунтовый массив энергетическая составляющая генератора затрачивается на формирование силового импульсного воздействия, амплитуда которого обуславливается геометрическими размерами внедряемого элемента и сопротивляемостью породы, а также на упругую и пластическую деформацию грунта, которая напрямую связана с величиной полного перемещения за один цикл его нагружения [3].

Для обоснования критерием эффективности виброударных технологий и условий возможной практической реализации проведено экспериментальное исследование. Его целью являлась проверка возможности повышения производительности виброударного погружения в упругопластическую грунтовую среду трубчатых стальных профилей путем использования в качестве силового генерирующего модуля комбинированного возбудителя из двух устройств ударного действия с расширенным спектром воздействия как по частотным параметрам, так и по способу передачи полезной нагрузки на рабочий инструмент.

В качестве тела, внедряемого в грунтовую среду, использовалась стальная сборная трубная плеть 1 (рис. 1), состоящая из двух секций с наружным диаметром 33 мм, свинчиваемых резьбовыми муфтами. Забойная часть трубы длиной 1.9 м оснащалась коническим наконечником с углом при вершине 60°. На противоположном конце последней секции устанавливался импульсный генератор, представляющий собой комбинацию из двух пневмомолотов 2, 3 в продольной компоновке. Соединительным узлом служили полые переходные капсулы 7. Для фиксации пневмомолотов относительно забиваемой трубы использовались конические насадки и стяжные устройства 8. Дополнительное статическое усилие в осевом направлении создавалось набором пригрузов 4 общей

массой от 25 кг до 100 кг. Передача нагрузки осуществлялась через промежуточный демпфирующий элемент 5 и шкворень 6, входящий в поперечное отверстие погружаемой трубы. Измерительная часть стенов включала: тензометрический датчик Д в виде отрезка трубы длиной 250 мм. и диаметром 33 мм с наклеенными на их наружной поверхности тензорезисторами [4, 5], блок усилителей электрического сигнала БУ, цифровой преобразователь АЦП, соединенный с персональным компьютером ПК.

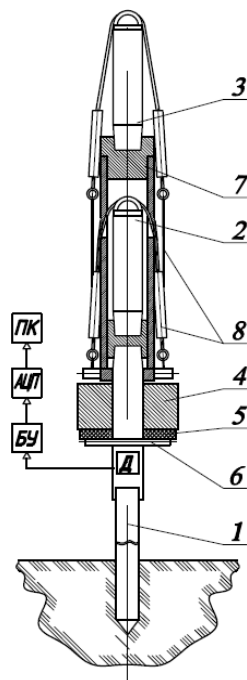


Рис. 1. Схема эксперимента с комбинированным генератором из двух устройств ударного действия:

- 1 – труба; 2, 3 – ударные модули; 4 – гравитационный пригруз; 5 – демпфер;
6 – шкворень; 7 – переходная капсула; 8 – стяжное устройство; Д – датчик силы;
БУ – блок усилителей; АЦП – преобразователь сигнала; ПК – компьютер

В качестве генераторов ударных импульсов использовались модели пневмомолотов с массами ударников 1 и 2 кг, выполненных по единой схеме воздушного распределения с упругим клапаном в камере обратного хода, заложенной в основе всех образцов машин типа «Тайфун» [6].

Грунтовая среда представляла собой плотную супесчаную смесь естественного залегания с пониженной влажностью, уровень которой составлял менее 10%.

Перед началом каждого эксперимента выполнялся ряд подготовительных операций:

- организация лидерной скважины глубиной 0.5 м от поверхности грунтового основания для вертикального направления трубной плети;
- предварительное внедрение головной части тубы длиной 1.9 м;

– присоединение второй секции, монтаж датчика усилий, установку вертикальной линейки длиной 2.0 м с ценой деления шкалы 1 мм для непрерывного контроля глубины погружения.

Процесс внедрения трубной плети экспериментальной ударно-импульсной установкой фиксировался на видеокамеру SONY HDR-SR10E, что позволяло после покадровой обработки полученного видеоклипа в программе Picture Motion Browser, определять время и рассчитывать среднюю скорость погружения элемента на каждом контрольном отрезке длиной 0.1 м. Регистрация результатов измерений начиналась с отметки 2 м и заканчивалась по достижению глубины 3.4 м.

Анализ полученных диаграмм силовых импульсов показал, что, независимо от величины и структуры ударной мощности источников периодической нагрузки, ее амплитуда поддерживается в пределах: $F_{max} = 15\text{--}21$ кН как при $E=9$ Дж, $f=13.5$ Гц, так и при $E=17$ Дж, $f=6.4$ Гц. Такой уровень силового воздействия обеспечивает преодоление сопротивления грунтового массива трубчатым элементом и его поступательное перемещение.

Одновременное включение в работу двух устройств ударного действия несколько изменяет картину моделируемого процесса. Так значения амплитуд ударных импульсов колеблются в больших пределах от $F_{max} = 11$ кН до $F_{max} = 24$ кН, а суммарная результирующая частота силового воздействия приобретает переменные значения, достигая 19.9 Гц. При этом наблюдается приращение скорости перемещения трубной плети (кривая 3, рис. 2) в грунтовом массиве, представляющее собой не простое сложение соответствующих величин от каждой машины в отдельности (кривые 1, 2) а превышающее их суммарные значения в 1.1 – 1.8 раза.

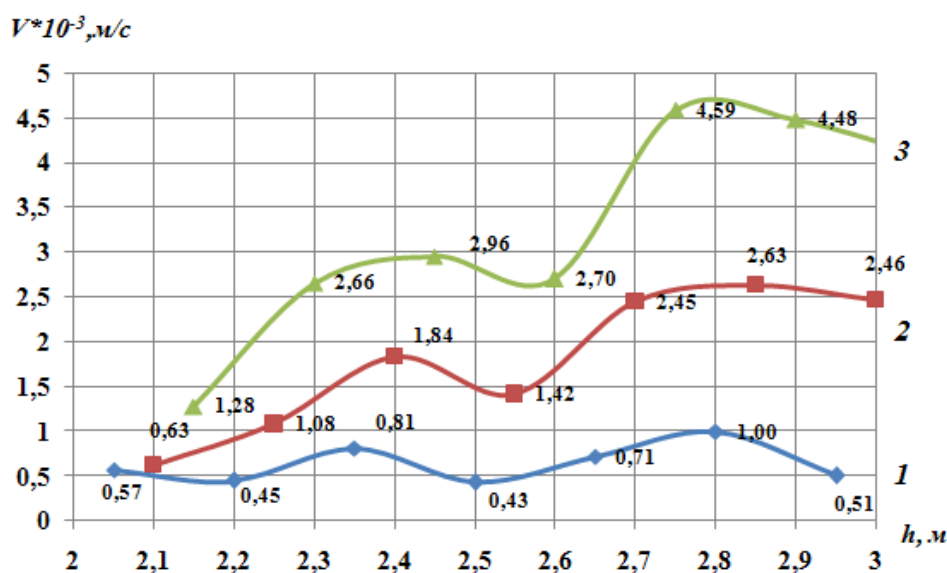


Рис. 2. Изменение скорости внедрения трубной плети при различных способах воздействия:

1 – пневмомолот «Тайфун-1»; 2 – пневмомолот «Тайфун-2»;
3 – совместная работа двух ударных устройств

Очевидно, что такие изменения связаны с параллельным воздействием на погружаемый элемент сразу двух несинхронизированных между собой импульсных источников, удары которых могут, как совпадать, так и наноситься через различные промежутки времени.

Этот положительный фактор свидетельствует об улучшении условий взаимодействия элементов системы «грунтовой массив – забиваемый элемент – источник ударной нагрузки», что выражается в более эффективной разработке забоя вследствие уменьшения сопротивления грунтовых слоев сдвигу за счет ослабления сцепления между частицами грунта и снижения коэффициента его внутреннего трения. В результате увеличивается величина перемещения рабочего инструмента за каждый ударный импульс, что в совокупности с ростом частоты ударов обеспечивает повышение производительности всего технологического процесса.

Выводы:

1 Расширение спектра силового воздействия путем присоединения к погружаемому элементу двух пневмомолотов с необходимой энергией единичного удара, установленных последовательно вдоль оси трубной плети, приводит к росту частоты ее нагружения, сопровождающемуся улучшением условий взаимодействия рабочего инструмента с забоем и повышением скорости его продвижения, опережающему соответствующие показатели при суммировании ударной мощности комбинированного модуля в 1.1–1.8 раза.

2. Результаты эксперимента с комбинированным основным источником ударной нагрузки позволяют продолжить работу в данном направлении, наметив следующие задачи его дальнейшего совершенствования:

– согласование режимов работы двух пневмомолотов с целью синхронизации их частотных характеристик путем введения системы автоматической регулировки с обратной связью;

– разработка конструктивных схем и создание высокочастотного импульсного модуля с двумя или несколькими ударными массами, объединенными в одном корпусе и имеющими единую систему воздушораспределения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В. и др. Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. – 2008. – № 5. – С. 72–80.

2. Червов В. В., Тищенко И. В., Смоляницкий Б. Н. Влияние частоты виброударного воздействия и дополнительного статического усилия на скорость погружения стержня в грунт // ФТПРПИ. – 2011. – № 1. – С. 61–69.

3. Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И. Характер силового импульса в стержне, погружаемом в грунт виброударным воздействием // Сб. науч. тр. Конф. С участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». Т. 2. Машиностроение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

4. Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х., и др. Тензометрия в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1975.
5. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. – Л.: Энергия, 1970.
6. Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицин В. В., и др. Новые пневмоударные машины «Тайфун» для специальных строительных работ // Механизация строительства. – 1997. – № 7.

© И. В. Тищенко, В. В. Червов, А. И. Горелов, 2014

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ
ДЛИННОХОДОВЫХ АВТОНОМНЫХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ
ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЖКХ,
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ГОРНОГО ДЕЛА**

Василий Николаевич Белобородов

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) 217-08-80

Анатолий Антонович Репин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, тел. (383)217-08-61, e-mail: repin@misd.nsc.ru

Андрей Константинович Ткачук

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) 217-08-80

Владимир Николаевич Карнов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383) 217-09-63, e-mail: repin@misd.nsc.ru

Обоснована необходимость создания легких мобильных источников ударного импульса 200÷300 Дж. Приведены некоторые аспекты проектирования длинноходовых автономных сейсмоисточников. Обозначены пути дальнейшего совершенствования создаваемых машин. Разработаны и исследованы некоторые конструктивные элементы (ударники и уплотнения). Приведены графики скорости разгона различных ударников с различными уплотнениями.

Ключевые слова: пластиковые корпуса, скорость ударника, энергия удара, машины двойного действия, температурные факторы, воздухоудвки, конструкционные и уплотнительные материалы.

**PROSPECTS FOR DESIGNING LONG-STROKE SELF-REACTING
DOUBLE ACTION DEVICES FOR CONSTRUCTION, MUNICIPAL HOUSING,
SEISMIC EXPLORATION AND MINING**

Vasily N. Beloborodov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Laboratory for Drilling and Process Pulse Machines, tel. (383)217-08-80

Anatoly A. Repin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Assistant Professor, Deputy Director for Science, tel. (383)217-08-61, e-mail: repin@misd.nsc.ru

Andrey K. Tkachuk

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Senior Researcher, Laboratory for Drilling and Process Pulse Machines, tel. (383)217-08-80

Vladimir N. Karpov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Laboratory for Drilling and Process Pulse Machines, tel. (383)217-09-63, e-mail: repin@misd.nsc.ru

The authors discuss topicality of light-weight mobile 200–300 J shock impulse sources. Some aspects of design of long-stroke self-reacting seismic sources are presented and the ways of upgrading of the designed machines are shown. The authors have developed and examined structural elements (hammers and seals) of such machines. Runway speed curves are presented for various hammers with various seals.

Key words: plastic housing, hammer speed, blow energy, double action machine, temperature factor, air blower, engineering and sealing materials.

В ряде отраслей народного хозяйства затруднено использование тяжелой и дорогостоящей пневмо- и гидроударной техники. В частности, в ИГД СО РАН была поставлена задача разработки легкого и мобильного источника ударного импульса с энергией $200 \div 300$ Дж для оперативной малоглубинной сейсморазведки. Традиционные установки такого типа имеют массу $200 \div 500$ кг, причём не включая массу источника энергии. Учитывая это обстоятельство, усилия группы разработчиков были сконцентрированы на создании длинноходовых компрессионно-вакуумных машин. При увеличении длины рабочего хода возможен разгон ударника при малой силе отдачи и сравнительно небольшом (несколько g) разгоняющем ускорении. С другой стороны, давно существуют установки типа копра (ускорение 1 g), которые неудобны из-за большого габаритного размера.

Заметим, что в XX веке одной из фирм Франции выпускались длинноходовые КВУМ [1], однако изготовление громоздких, тяжелых корпусов из металла и отсутствие мощных легких воздуходувок не позволило создать перспективную технику подобного рода. Уже с первого этапа работ выше обозначенной тематике предполагалось создание типоразмерного ряда машин с различными массами ударника для различных применений. Один из экспериментальных образцов был испытан при разрушении неармированных бетонных тумб при реконструкции новосибирского бассейна «Нептун». Впервые корпус ударной машины был выполнен из стандартной пластиковой трубы $\varnothing 160$ мм. Несмотря на невысокую скорость ударника (машина типа гравитационного копра с вакуумным взводом), благодаря увеличению массы поднимаемого ударника и конструкции разрушающего инструмента был достигнут положительный результат. Вторым этапом работ явилось заключение договора с УрО РАН, когда в технических условиях было оговорено значение энергии удара в $200 \div 300$ Дж. Исходя из ТЗ была сделана оценка мощности приводной воздухо-

дувки, ориентировочно 2 кВт, для обеспечения требуемой производительности зондирования [2]. В процессе натурных испытаний разработанных ударных устройств с массой ударника 20 кг и 40 кг была обнаружена их принципиальная работоспособность, но выявлена невозможность использования для специфических целей малоглубинной сейсморазведки ударников с массой более 10 кг с учетом заданного в ТЗ диапазона энергий удара.

Отсюда возникла необходимость разработки машин того же диапазона энергий, но с увеличенной до предела по прочности скоростью удара. С учетом требований к габариту по высоте, началась работа по созданию машин двойного действия. Следует отметить, что наиболее подходящей по параметрам и доступности воздуходувкой оказался профессиональный пылеводосос фирмы Delvir Blaster, обеспечивающий перепад давлений при всасывании $\sim 0,035$ МПа. Был выявлен ряд недостатков, связанных с влиянием температурного (отрицательные температуры) фактора на функционирование уплотнений ударника.

На основании результатов испытаний было принято решение создать машины подобного типа с дополнительным к силе тяжести разгоняющим ускорением, т.е. машин двойного действия. В связи с этим были предприняты прикладные исследования, касающиеся улучшения характеристик используемых уплотнений ударника, направленные на снижение утечек без увеличения при этом трения и без ужесточения требований к точности размеров корпуса. Также был изучен рынок легких автономных бензиновых, либо дизельных воздуходувных агрегатов. К сожалению, существующие вихревые промышленные воздуходувки весьма дороги и поставляются в комплекте с тяжёлыми электродвигателями, хотя невысокие обороты делают возможным их привод без редуктора от двигателя внутреннего сгорания. В результате, были приобретены две готовые воздуходувки на базе ДВС различной мощности, но с более низкой разностью давлений (0,005-0,01 МПа).

С учетом требования снижения массы ударника были проведены испытания и выяснилось, что более мощная воздуходувка оказалась способна взводить облегченный ударник, преодолевая силу тяжести. Были разработаны и изготовлены в лабораторных условиях два варианта ударников с различными типами уплотнений (рис. 1): пластиковым и пористым.



Рис. 1. Два варианта ударников с различными типами уплотнений

Результаты испытаний ударников по разработанной ранее методике [3] приведены на графике (рис. 2).

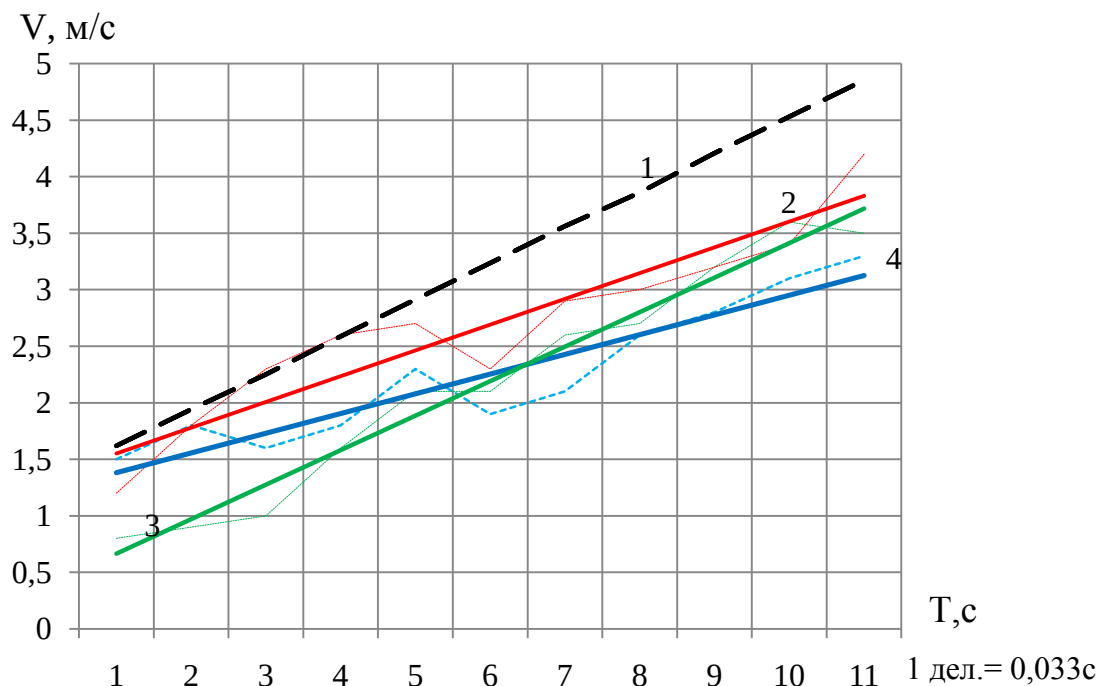


Рис. 2. Результаты эксперимента по разгону ударника в длинноходовой КВУМ двойного действия:

1 – свободное падение ударника (теория); 2 – разгон ударника с пористым уплотнением, пропитанный пенным реагентом (линия тренда); 3 – ударник с полимерными манжетными уплотнениями и масляной смазкой (линия тренда); 4 – ударник с манжетными уплотнениями без смазки (линия тренда); Ломаные линии соединяют отдельные экспериментальные точки

Анализ результатов испытаний ударников позволил сделать вывод о более скоростных характеристиках ударника с пористым покрытием, пропитанным пенным реагентом. После взвода ударник фиксировался управляемым магнитным фиксатором (рис. 3) на постоянных магнитах с возможностью установки управляющей катушки.



Рис. 3. Управляемый магнитный фиксатор

Кроме того, соединение корпуса с верхним конструкционным модулем, включающим текстолитовый диск с расположенным на упругой связи управляемым магнитным фиксатором, было выполнено быстроразъемным. Испытания в лабораторных и полевых условиях подтвердили работоспособность разработанной конструкции.

На испытываемые экспериментальные конструкции получен ряд патентов и положительных решений ВНИИГПЭ. Проводятся также исследования по разработке датчиков, управляемых клапанов и др. устройств, необходимых для автоматизации рабочего цикла и управления энергией и моментом удара комплекса ударных машин. При этом предполагается использование современных конструкционных и уплотнительных материалов на базе нанотехнологий, а также уже выпускаемых отечественной промышленностью (трубы из стеклопластика, износостойкие полимерные уплотнения с твердой смазкой, постоянные магниты с редкоземельными элементами) и получившие широкое распространение в потребительской сфере.

Подводя итог проделанной работе можно констатировать возможность создания легких, мобильных ударных автономных устройств с малой силой отдачи и высокой энергией единичного удара с использованием пластиковых корпусов и современных воздуходувок взамен компрессора. В перспективе возможна электронная синхронизация работы комплекса таких машин и регулирование их энергии удара, вплоть до компьютерного управления. К достоинствам таких машин можно отнести легкость их оперативного ремонта непосредственно на предприятиях, а также пониженные требования к точности и чистоте обработки составных частей. Вероятные области использования таких машин – оперативная малоглубинная сейсморазведка, строительство и коммунальное хозяйство.

В рамках продолжения НИР были предложены и реализованы следующие схемы (рис. 4, 5) сейсмоисточников двойного действия:

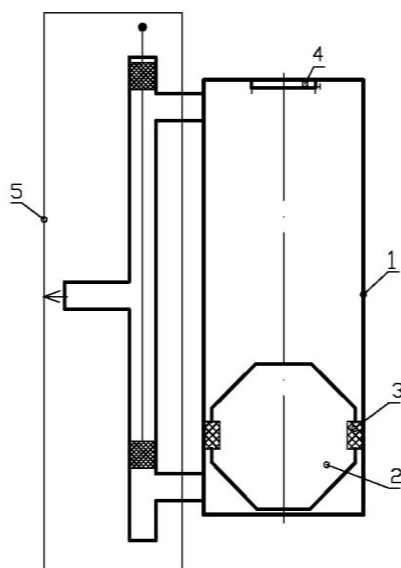


Рис. 4. Сейсмоисточник двойного действия с линейным переключателем:

1 – корпус; 2 – ударник; 3 – уплотнение; 4 – магнит; 5 – линейный переключатель

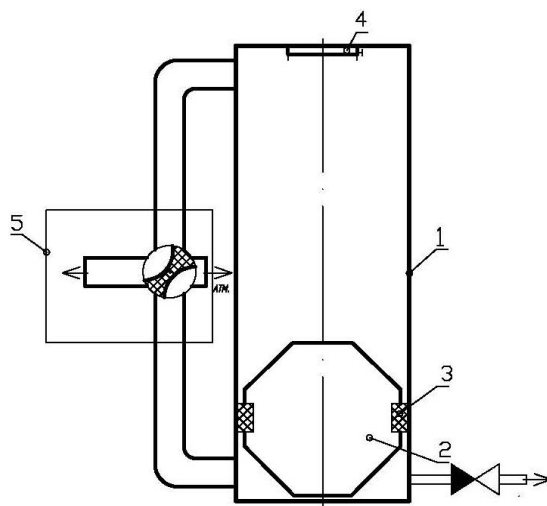


Рис. 5. Сейсмоисточник двойного действия с поворотным переключателем:

1 – корпус; 2 – ударник; 3 – уплотнение; 4 – магнит; 5 – поворотный переключатель

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палагин В.В. и др. Сейсморазведка малых глубин // - М.: Недра, 1989, – С.19.
2. Белобородов В.Н., Репин А.А., Ткачук А.К. Разработка длинноходовой компрессионно-вакуумной ударной машины // Труды конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (28 июня – 02 июля 2008 г.) Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010, т. 3, –С. 218-221.
3. Белобородов В.Н., Ткачук А.К. Способ экспериментального определения динамических параметров машин ударного действия // Сборник трудов конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (9–12 октября 2012 г.) в II т. Т. II. Машиноведение. – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2012. –С. 74-76.

© В. Н. Белобородов, А. А. Репин, А. К. Ткачук, В. Н. Карпов, 2014

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИЖЕНИЙ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА РАЗРЕЗНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ЕГО ПОДРАБОТКИ

Дмитрий Васильевич Барышников

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (383)217-05-41, e-mail: d-baryshnikov@yandex.ru

Приведено краткое описание методов наблюдений и схема расположения станций для контроля сдвижений закладочного массива при отработке кимберлитовой трубки с применением слоевой нисходящей системы разработки. По результатам экспериментальных наблюдений получена оценка осадок закладки разрезного слоя при выемке запасов нижележащего слоя.

Ключевые слова: инклинометр, зонд, скважина, осадка.

DETERMINATION OF DISPLACEMENT OF UNDERMINED BACKFILLED STOPE ON ACCESS LEVEL

Dmitry V. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Laboratory for Diagnostics of Mechanical Condition of Rocks, tel. (383)217-05-41

The article gives a summary description of observational methods and layout of observation stations aimed at the backfill mass displacement control in the top-down slice mining of kimberlite pipe. Based on the experimental observation results, subsidence of the backfilled access level in the course of the underlying ore reserves development has been estimated.

Key words: directional survey tool, sounding borer, hole, subsidence.

Для защиты горных выработок от прорыва рассола с метегеро-ичерского водоносного комплекса (МИВК) на руднике «Интернациональный» АК «АЛРОСА» предусмотрено оставление рудного предохранительного целика. Почва водоносного комплекса расположена на а.о. –97 м, а граница безопасного ведения очистных работ по расчетам НТЦ «НОВОТЭК» (г. Белгород) установлена на а.о. –150 м [1]. Отработка кимберлитовой трубки ниже этой границы осуществляется по проекту с применением слоевой нисходящей системы разработки и твердеющей закладкой. Очистные работы начинаются с выемки разрезного слоя по камерно-целиковой схеме. Высота слоя составляет 4 м (а.о. –155 ÷ –159 м), а ширина очистных заходок принята 5 м. При ведении горных работ необходим обязательный контроль состояния предохранительного целика, осуществляемый в соответствии с разработанным НТЦ «НОВОТЭК» в 2013 г. проектом гидрогеомеханического мониторинга (ГГМ) [1]. Геомеханическая часть проекта ГГМ разработана ИГД СО РАН и предусматривает инструмен-

тальные наблюдения за сдвижением вмещающих пород и рудного предохранительного целика, а также формируемого закладочного массива, являющегося его основанием (упором).

Для проведения наблюдений предложены следующие методы:

- контроль осадки кровли закладочного орта, пройденного во вмещающих породах, осуществляется по станциям контурных реперов (СКР);
- контроль вертикальных сдвижений закладочного массива разрезного слоя по мере отработки нижележащих запасов кимберлитовой трубки осуществляется с использованием метода инклинометрии, основанного на определении изменения профиля скважины посредством измерения углов наклона обсадной трубы через заданные интервалы вдоль всей длины контролируемой скважины [2,3];
- контроль горизонтальных сдвижений закладочного массива осуществляется по станциям глубинных реперов (СГР);
- скважинные визуальные наблюдения (СВН) позволяют определить местоположение зон возможного предельного деформирования (участки локализаций деформаций) закладочного массива в процессе развития очистных работ, что в комплексе с инструментальными наблюдениями обеспечивает оценку предельных деформаций.

В центральной ленте (лента 7) в отработанном и заложенном разрезном слое 9 была оборудована комплексная замерная станция перед отработкой слоя 8 (рис. 1), включающая станции глубинных реперов (СГР), инклинометрических (СИН) и визуальных наблюдений (СВН).

Измерение начальных значений по СКР и определение высотной отметки устья инклинометрической скважины выполняется путем нивелирования с передачей высотных отметок от опорного репера, расположенного за зоной влияния очистного пространства (рис.1). Измерения начальных значений по СГР выполняются с помощью разработанного ИГД СО РАН глубиномера. Определение исходного профиля инклинометрической скважины осуществлялось по усредненным значениям углов наклона обсадной трубы после 4х циклов измерений в направлениях «прямо» и «обратно». Перед отработкой слоя 8 проведен визуальный осмотр околоскважинного пространства с видео регистрацией состояния контура. При этом установлено, что нарушений в закладочном массиве не обнаружено.

После подработки разрезного слоя нижележащим слоем 8 был произведен следующий цикл наблюдений. Замеры по СГР и СКР не показали существенных изменений. По данным инклинометрических измерений было установлено изменение профиля скважины (рис. 2а), а также определены вертикальные сдвиги закладочного массива по глубине скважины, вызванные отработкой одного нижележащего слоя (рис. 2б). Максимальные сдвиги отмечены в центральной части трубки (40 – 45 м от устья скважины), а их величина составила 70–73 мм.

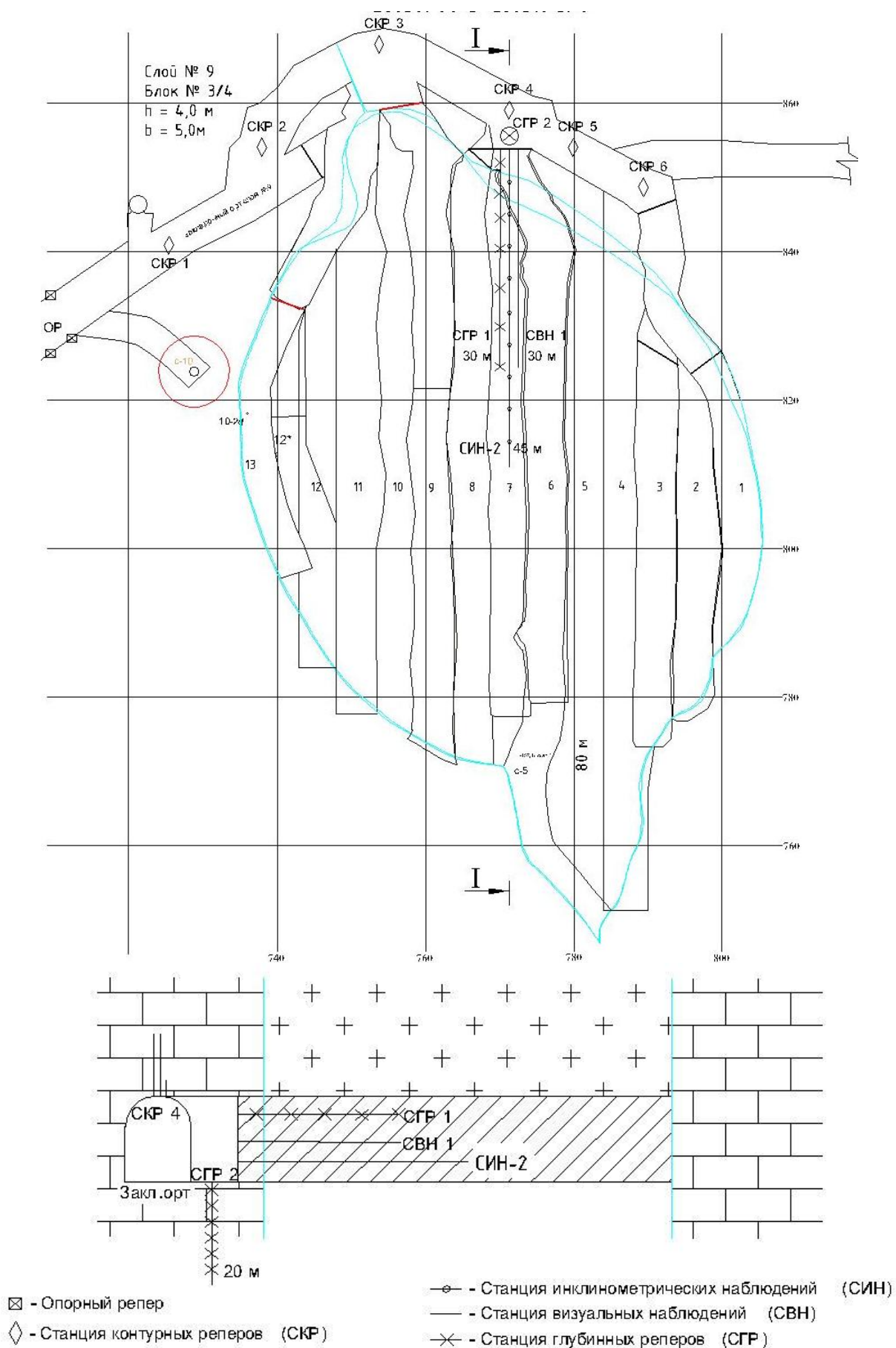
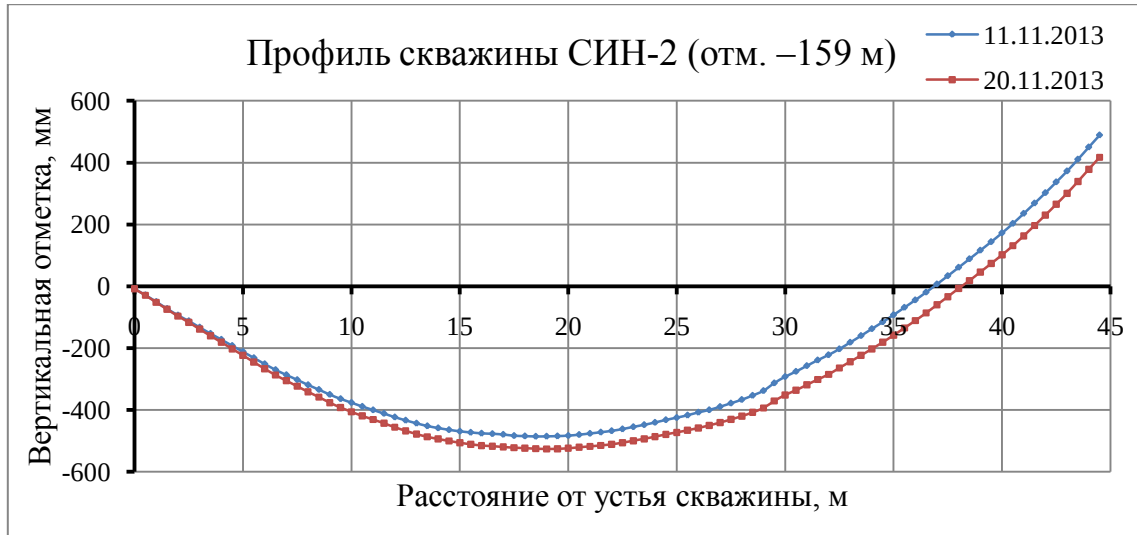


Рис. 1. Схема размещения инклинометрической станции на гор. –159.0 м

a



б



Рис. 2. Результаты инклинометрических наблюдений:

a – профиль измерительной скважины: до подработки (11.11.2013 г.), после отработки нижележащего слоя (20.11.2013 г.); *б* – вертикальные сдвиги слоя закладки

Таким образом, предложенная комплексная система наблюдений позволяет контролировать при отработке нижележащих слоев не только процесс сдвижений закладочного массива в основании предохранительного целика, но и определять величины критических деформаций закладки, которые вызывают нарушение ее сплошности (на участках разрушений контура наблюдательной скважины), а также местоположение зон локализаций запредельных деформаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудник «Интернациональный». Отработка запасов блоков –560/–790 м и –155/–200 м. проектная документация. Книга 3. Система гидрогеомеханического мониторинга. Том 5.7.3. – Белгород: НОВОТЭК, 2013.
2. Барышников В.Д. Барышников Д.В. Организация и проведение наблюдений за сдвигами закладочного массива при его подработке // Горный информационно-аналитический бюллетень.– М.– №12, – 2008.– с.256–261.
3. Барышников В. Д., Качальский В. Г., Барышников Д. В. Опыт применения инклинометрии для контроля сдвигов закладочного массива при подземной разработке месторождений // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 225–229.

© Д. В. Барышников, 2014

ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ДЕБЕТ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Михаил Николаевич Цупов

ООО «Шахта «Чертинская-Южная»», 652645, Россия, г. Белово, Кемеровская обл., 5-я рудничная, 90, горный мастер, тел. +79039427257, 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, научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

Приведены результаты анализа влияния сейсмических колебаний на месторождения углеводородов и газового контроля на угольных шахтах Кузбасса в период землетрясений.

Ключевые слова: сейсмическое событие, увеличение дебета, газовый контроль.

SEISMIC EFFECT ON FLUID AND GAS MINERAL YIELD

Mikhail N. Tsupov

Chertinskaya-Yuzhnaya Mine, 652845, Russia, Belovo, Kemerovo Region, 90 5th Rudnichnaya St., Overman, tel. +79039427257, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, PhD Eng, Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Pulse Systems, tel. (383)217-01-26, e-mail: av_sav@ngs.ru

The analysis of the effect exerted by seismic vibration induced by an earthquake on hydrocarbon deposits and coal mine gas control in Kuzbass is presented in the article.

Key words: seismic event, yield increase, gas control.

На протяжении всего периода эксплуатации нефтегазовых месторождений имеется множество фактов влияния сейсмических событий на повышение дебета скважин.

В качестве примеров, подтверждающих это, можно привести землетрясение в Южной Калифорнии в 1952 г., которое вызвало местами десятикратное увеличение давления на устьях фонтанирующих скважин, эффект продолжался более двух недель. На Новогрозненском месторождении после землетрясений 1950 и 1955 гг., интенсивность которых достигала 6 - 7 баллов, происходило повышение пластовых давлений и дебета нефти. Во время Дагестанского землетрясения в 1970 г. дебиты скважин повысились на нефтяных залежах в радиусе более 200 км от эпицентра. Так, на одной из скважин Эльдаровского месторождения, расположенной в 220 км от эпицентра землетрясения, увеличение дебита составило более 900 т/сут. [1].

Известны случаи влияния на нефтяные залежи вибрации, создаваемой действием не только природы, но и человека, например, дебиты скважин увеличивались при прохождении вблизи них тяжеловесных железнодорожных составов. В XIX веке в США вокруг нефтяных скважин промышленники выкапывали глубокие траншеи и закладывали в них мешки с порохом, после взрывов дебиты скважин часто значительно увеличивались.

Широко известны работы по вибросейсмическому воздействию на нефтяные пласты с целью интенсификации добычи нефти, проводимые Институтом горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Вибросейсмическое воздействие осуществлялось с поверхности земли виброисточниками дебалансного типа. Испытания проводились более чем на 15 месторождениях, на которых получены значительные увеличения дебитов нефти [2].

Основываясь на положительных результатах вибросейсмического воздействия на нефтегазовые пласты, было принято решение проследить влияние различных сейсмических событий, в т.ч. и землетрясений (как источника обладающего наибольшей энергией воздействия) на газовыделение из угольных пластов на шахтах Кузбасса.

Только за 2013 год территория Кузбасса была подвержена нескольким крупным сейсмическим воздействиям, имеющим природный и техногенный характер.

Землетрясение, произошедшее в Кузбассе 19 июня 2013 г. в 6:02 по местному времени (3:02 по московскому времени) стало крупнейшим в регионе за 100 лет. По данным Геофизической службы Сибирского отделения РАН, магнитуда землетрясения составила 5,3-5,6. Интенсивность землетрясения в эпицентре составила 7 баллов, который зафиксирован в 3 км к западу от поселка Старобочаты и на расстоянии 21 км от г. Белово. Гипоцентр землетрясения находился на глубине 9,8 км.

По показаниям систем автоматического газового контроля (АГК) шахт ООО «Шахта Чертинская-Коксовая» и ООО «Шахта Чертинская-Южная», расположенных в городе Белово Кемеровской области, на отдельных датчиках были зарегистрированы всплески метановыделения.

Так забойный датчик западного конвейерного уклона (ЗКУ) показал многократное превышение метановыделения (рис. 1) после произошедшего землетрясения (справа от пунктирной линии) по сравнению с работой комбайна совершающего разрушение угольного пласта (слева от пунктирной линии) объемом при шаге захода комбайна $0.8 \text{ м} * 16 \text{ м}^2$.

Также после сейсмического события увеличилась средняя концентрация метана в исходящей струе лавы с 0,099 до 0,249. Данные отбирались в первую смену (темный прямоугольник на графике) до землетрясения и после (рис. 2а и 2б соответственно) в период, когда работы в шахте по разрушению угля не проводились.

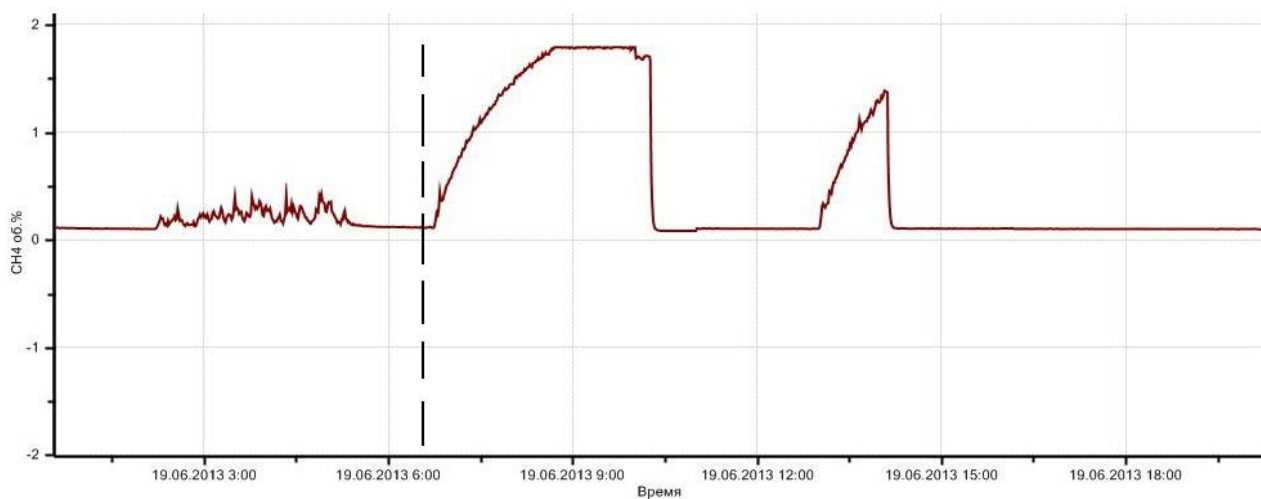
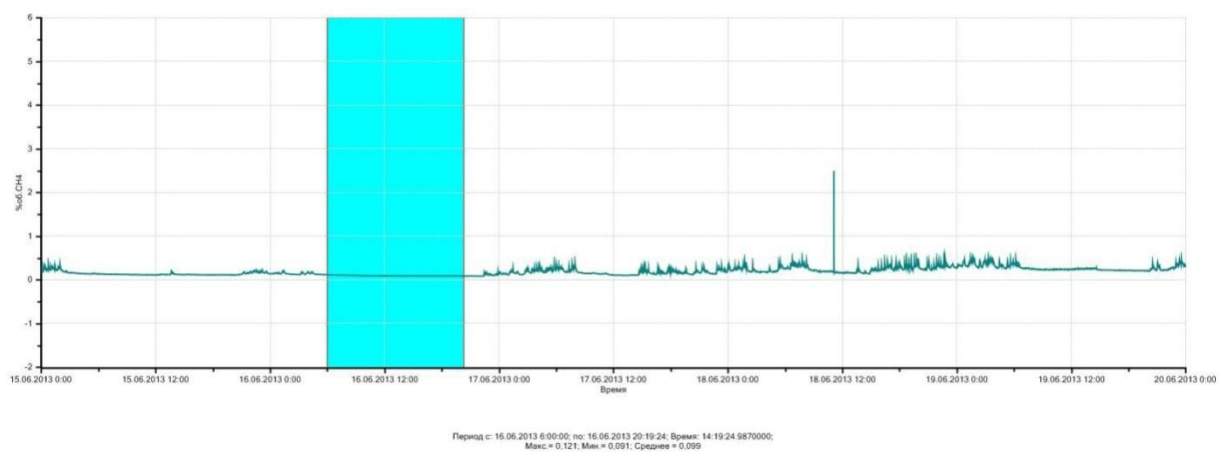


Рис. 1. Датчик ЗКУ забойный

а



б

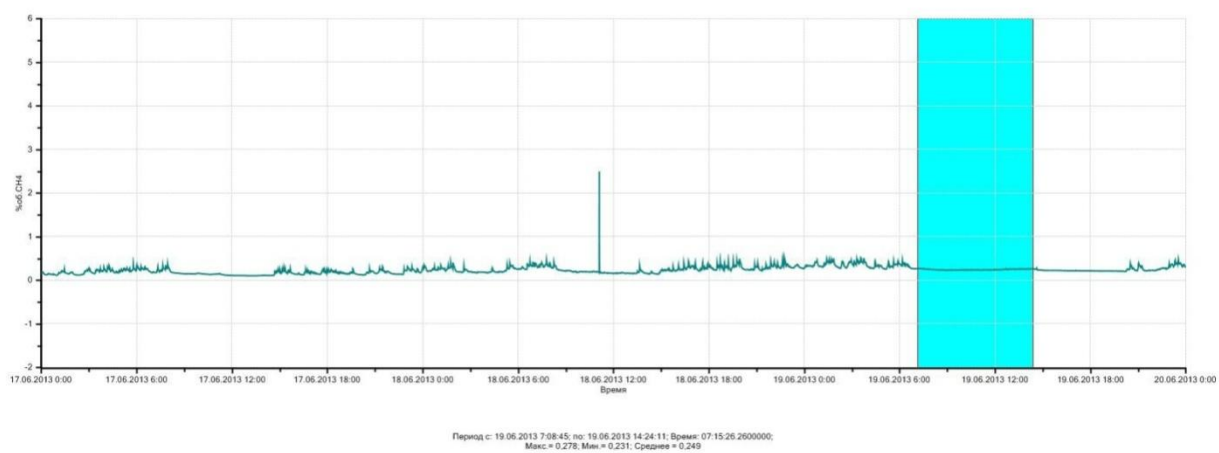


Рис. 2. Исходящая струя лавы *а* - до землетрясения, *б* - после землетрясения

И как следствие, произошло увеличение содержания метана в исходящей струе крыла шахты (рис. 3).

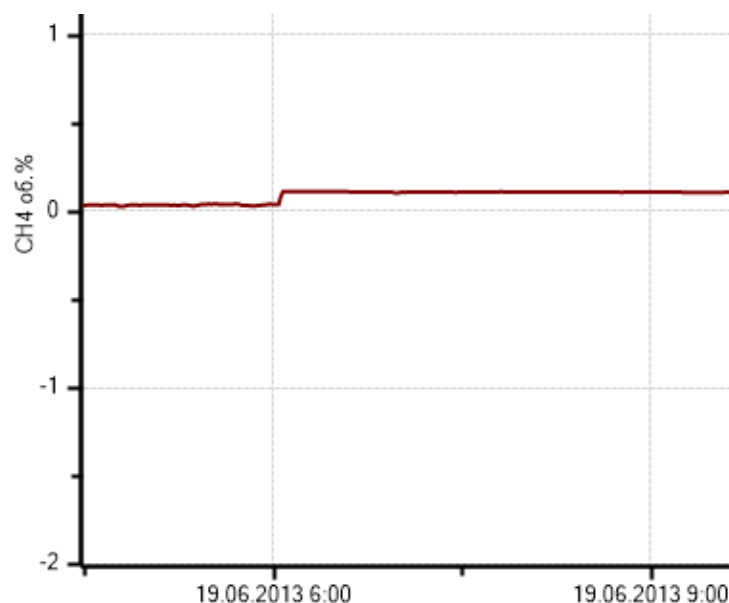


Рис. 3. Ходок центрального бремсберга (наклонный ствол)

После прекращения работ и остановки шахты в течение суток наблюдались незначительные всплески метановыделения, которые регистрировались датчиками на исходящей струе наклонного ствола (рис. 4).

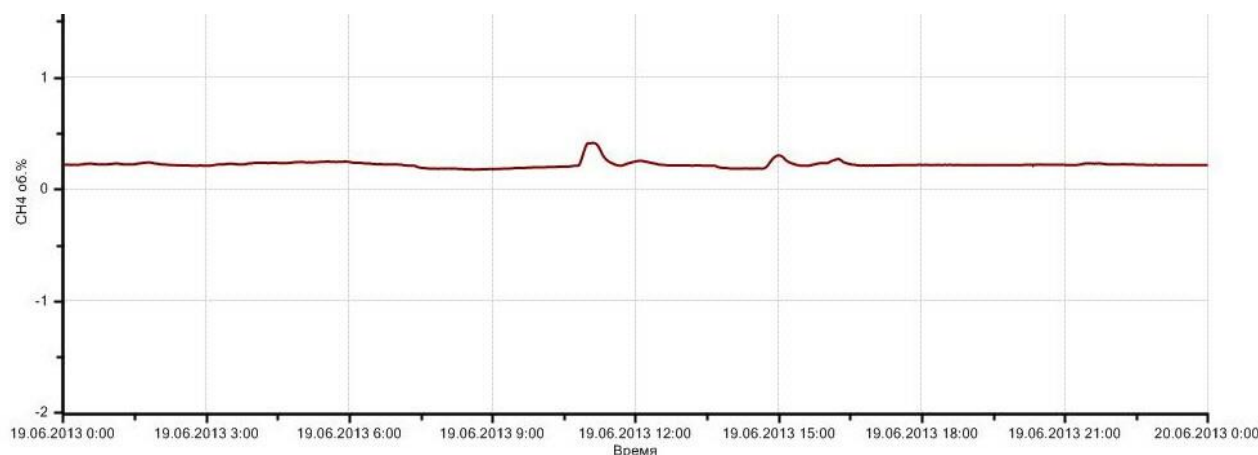


Рис. 4. Датчик исходящей струи на бремсберге (наклонный ствол)

В целом, за этот период по шахтам Кузбасса газовая обстановка значительно не изменялась.

Механизм вибровоздействия на нефтегазовые пласты рассмотрен достаточно подробно, имеется теоретическая база подтвержденная лабораторными и промысловыми экспериментами.

Известны единичные работы по исследованию влияния вибрации на угольный массив, имеющие достаточно противоречивые результаты, не позволяющие создать единую теоретическую базу. На данный момент, увеличение газовыделения при воздействии вибрации высокой интенсивности связывается, главным образом, с разупрочнением массива горных пород и образованием новых трещин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шариффулин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия - М.: Недра, 2000. – 381 с.
2. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях - Новосибирск: Наука, 2010.

© М. Н. Цупов, А. В. Савченко, 2014

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ГИДРОРАЗРЫВА В СЖАТОМ КВАЗИРЕГУЛЯРНОМ БЛОЧНОМ МАССИВЕ

Петр Александрович Мартынюк

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики взрыва, тел. (383)335-96-54, e-mail: vzrivlab@misd.nsc.ru.

Евгений Николаевич Шер

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией механики взрыва, тел. (383)335-96-54, e-mail: ensheer@sibmail.ru.

Проанализировано влияние нерегулярности строения сжатого блочного массива на процесс развития трещины гидроразрыва. Исследован предельный случай, когда двусосное поле сжатия является изотропным.

Ключевые слова: гидроразрыв, блочный массив, поле сжатия, раскрытие трещин.

FEATURES OF HYDRAULIC FRACTURING IN A QUASI-REGULAR BLOCK ROCK MASS IN COMPRESSION

Petr A. Martynyuk

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 54 Kransy prospect, PhD, tel. (383)365-96-54, e-mail: vzrivlab@misd.nsc.ru

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 54 Kransy prospect, Dr Eng, tel. (383)365-96-54, e-mail: ensheer@sibmail.ru

The influence of structural nonregularity of the compressed block rock mass on the process of hydrofracturing is analyzed. The authors study the limit case of the isotropic biaxial compression field.

Key words: hydraulic fracturing, block rock mass, compression field, fracture opening.

Проведено моделирование распространения трещины гидроразрыва в блочной среде квазирегулярного строения. Рассматривается массив с выраженным направлением напластования и структурой, аналогичной кирпичной кладке. В расчетах принимается, что трещина развивается вдоль граней блоков, ориентация и размеры которых имеют случайные отклонения от значений регулярной блочной структуры.

Постановка задачи.

Рассматривается плоская деформация. В упругой среде имеется начальная прямолинейная трещина, ориентированная по направлению максимального сжатия, которая выходит на границу блочного массива. Полагаем, что левый

конец этой трещины находится на скважине, через которую проводится нагнетание жидкости, поэтому трещина сохраняет свою длину.

Схема исследуемой задачи изображена на рис.1а, где прямолинейные участки соответствуют граням блоков. Каждая узловая точка сетки блоков является точкой стыковки трех блоков. При выходе трещины в узловую точку, возникают две зародышевые трещины малой длины, которые в процессе гидроразрыва могут прорасти до следующих узловых точек. Ставится задача – в упругом теле, сжатом на бесконечности напряжениями интенсивностью p и q ($q/p \leq 1$, γ – угол между направлением максимального сжатия p и осью Ox) имеется система связанных трещин, состоящая из прямолинейных звеньев, которая нагружена изнутри давлением жидкости. Требуется проследить ее дальнейшее развитие в зависимости от основных параметров: поля сжатия, размеров, формы и ориентации блоков. В качестве рабочего флюида принимается идеальная жидкость. Делаются следующие основные предположения:

1. Массив считается изотропным упругим телом.

2. Трещина может развиваться только по границам блоков. Условие предельного равновесия берется в виде $K_1 = K_{IC}$, где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений в вершине звена трещины, а K_{IC} – вязкость разрушения прослоек (полагается, что она много меньше вязкости разрушения материала блока).

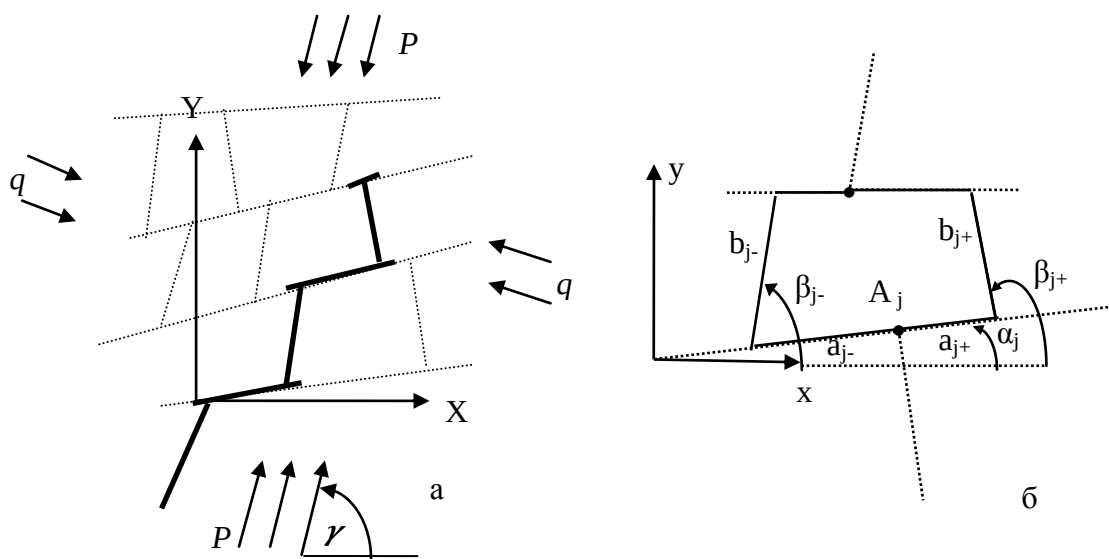


Рис. 1. а) Схема исследуемой задачи, б) Параметры произвольного блока

Сформулированная задача решается как суперпозиция двух задач. Первая – на бесконечности действует поле сжатия с параметрами p, q, γ , а границы звеньев трещины свободны, т.е. выполняются граничные условия:

$$\sigma_{nj} = \tau_{sj} = 0 \quad j = 1, N,$$

где N – число звеньев трещины, а σ_{nj}, τ_{sj} – нормальные и касательные напряжения.

Вторая – напряжения на бесконечности отсутствуют, а на границах трещины

$$\sigma_{nj} = -p \quad \tau_{sj} = 0 \quad j = 1, N.$$

Решение этих задач сводится к нахождению решения системы из N комплексных сингулярных интегральных уравнений [1-3]. Система решается численно с использованием квадратурных формул [3]. Развитие системы трещин происходит в равновесном режиме. Величина минимального давления жидкости p_* определяется не только выполнением условия предельного равновесия, но и условием протекания – требованием, чтобы нормальные раскрытия всех участков трещины до подрастающего звена были положительными. Задача решается по шагам. На каждом шаге находится критическое значение p_* и звенья системы, в которых выполнены условия продвижения. Эти звенья получают приращение, после чего вновь решается исходная задача для измененной геометрии трещины.

Результаты расчетов. На рис.1б изображен произвольный j -й блок. Его геометрия определяется длинами a_{j+}, a_{j-} – правого и левого звена ($l_j = a_{j+} + a_{j-}$ – длина горизонтальной грани блока), α_j – углом наклона грани к оси Ox , b_{j+}, b_{j-} – длинами боковых граней и β_{j+}, β_{j-} их углами наклона. Точка A_j – узловая. Все перечисленные значения параметров блоков в расчетах разыгрываются с использованием датчика случайных чисел. Блочный массив имеет выделенное направление напластования, определяемое углом α_0 , равным среднему значению углов α_j , при этом $\alpha_j = \alpha_0 \pm \Delta\alpha$. Чтобы оценить влияние отклонения формы блоков от прямоугольной, изменялся случайным образом угол наклона их боковых граней. При этом их среднее значение принималось равным 2γ , следовательно $\beta_j = 2\gamma \pm \Delta\beta$. Параметр b – среднее значение боковых размеров b_{j+}, b_{j-} характеризует среднюю толщину слоев и $b_j = b \pm \Delta b$. Параметр L – средняя длина блоков – $l_j = L \pm \Delta L$, a – средняя длина звеньев a_{j+} , т.е. $a_{j+} = a \pm \Delta a$. Критерий по трещиностойкости в принятом виде не зависит от абсолютных размеров блоков при их подобном изменении и от упругих констант E, ν (E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона) также как и критерий по протеканию. В расчетах размеры блоков приводятся в относительных к масштабу l_0 единицах. Величина l_0 может выбираться в соответствии с параметрами реального блочного массива.

В качестве иллюстраций приведем некоторые результаты численных расчетов при $q/p = 0,5$ ($\alpha_0 = 0, \Delta\alpha = 5^\circ, \Delta\beta = 20^\circ$) для трех вариантов случайного розыгрыша параметров блоков, и двух значений $\gamma : 35^\circ, 45^\circ$, при этом $\Delta L = 3$,

$\Delta a = 3$, $\Delta b = 0,5$: - в первом варианте $a = 4$; $b = 2$; $L = 6,4$; во втором варианте $a = 2,5$; $b = 2,5$; $L = 6,4$; в третьем варианте $a = 4,7$; $b = 2,6$; $L = 7,3$.

Для всех звеньев трещины находилось их безразмерное раскрытие по длине $\overline{h_1(s)}_j = \frac{\overline{h(s)}_j E}{4(1-\nu^2)pl_0}$. В качестве характеристики раскрытия звеньев принималось их среднее по длине звена раскрытие $\nu_{*j} = V_j/L_j$ (V_j - объем звена на единицу высоты, L_j - длина j -го звена). Размерное усредненное по длине звена раскрытие $\overline{h(s)}_j = \frac{4(1-\nu^2)pl_0}{E} \nu_{*j}$. Например, при $E = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $p = 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $\nu = 0,3$; $l_0 = 0,5 \text{ м}$ получаем $\overline{h(s)}_j = 1,21 \nu_{*j} \text{ мм}$.

На рис. 2а представлены результаты расчетов развития магистральной трещины для $\gamma = 35^\circ$, цифры 1-3 соответствуют номеру варианта. Величина $p_*/p \approx 0,64$ и имеет тенденцию уменьшаться с увеличением числа звеньев. Обозначим, $\max(\nu_*)_b$, $\min(\nu_*)_b$, $\max(\nu_*)_z$, $\min(\nu_*)_z$ наибольшие и наименьшие средние по длине раскрытия на вертикальных и горизонтальных участках. На момент окончания счета $\max(\nu_*)_b = 2 - 2,4$ в первом и третьем вариантах, а $\max(\nu_*)_b / \max(\nu_*)_z = 3,5 - 5$.

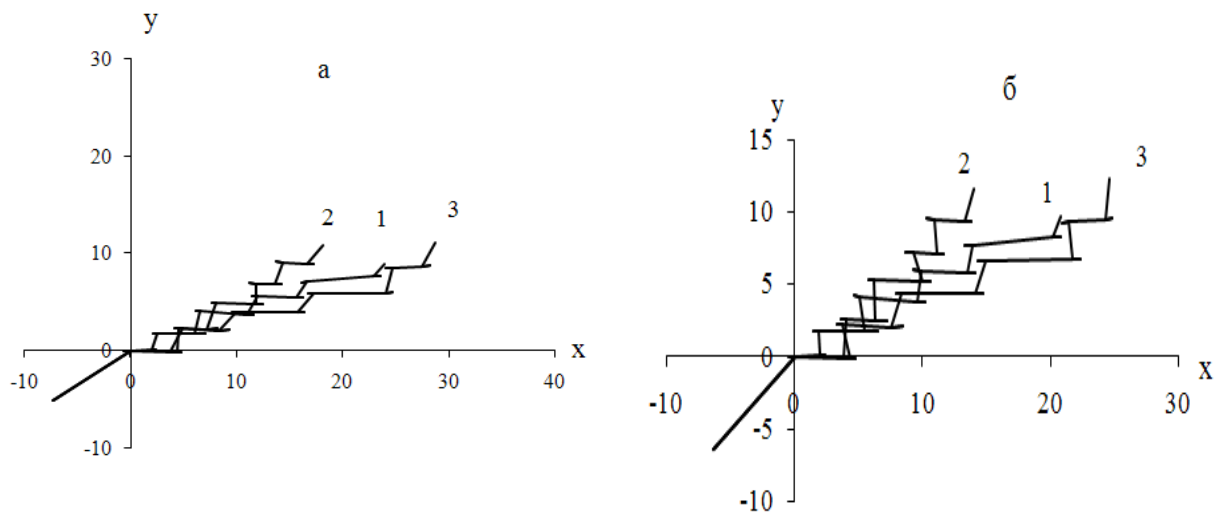


Рис. 2

Минимальные раскрытия получаются на горизонтальных участках и примерно в 20-30 раз меньше $\max(\nu_*)_b$. Во втором варианте, где $a/b \approx 1$, $\max(\nu_*)_b / \max(\nu_*)_z = 0,9 / 0,6 = 1,5$ и $\max(\nu_*)_b / \min(\nu_*)_z \approx 10$.

На рис. 2б изображены соответствующие магистральные трещины для $\gamma = 45^\circ$. Приведем некоторые характерные значения: критическое давление

$p_*/p \approx 0,7$; в первом варианте $\max(\nu_*)_b / \max(\nu_*)_z = 2,6/0,8 = 3,25$; во втором $\max(\nu_*)_b / \max(\nu_*)_z = 1,3/0,8 = 1,6$; в третьем $\max(\nu_*)_b / \max(\nu_*)_z = 3,6/0,6 = 6$.

Для всех $q/p \leq 0,9$ картина развития системы трещин во всех трех вариантах не меняется. С увеличением отношения q/p несколько возрастает критическое давление в жидкости и уменьшается раскрытие звеньев системы. Так при $q/p = 0,9$ раскрытие соответствующих участков трещины примерно в пять раз меньше, чем при $q/p = 0,5$.

Многочисленные расчеты показали, что при $\gamma = 35^\circ - 45^\circ$ и $q/p \leq 0,9$ зародышевые трещины не входящие в магистральную практически не развиваются, и, как видно на рис.2, магистральные трещины имеет ступенчатую форму.

При $q/p \rightarrow 1$ начинают развиваться зародышевые трещины, не входящие в магистральную. В целом, трещина сохраняет ступенчатую форму, но имеет дополнительные звенья, длины которых соизмеримы с размерами блоков. Как предельный случай, подробно исследован вариант, когда $q/p = 1$. С использованием датчика случайных чисел построена сетка блоков, для которой $\alpha_0 = \Delta\alpha = 0$; $\beta = 90^\circ \pm 10^\circ$; $l \in [-6; -4,5]$; $a_+ \in [-4,5; -2]$. Толщина слоев постоянная и равняется 2.

На рис. 3 представлена система трещин ($N = 25$) для этой блочной среды. Система трещин развивается при постоянном критическом давлении $p_* = 1,005 p$. Максимальные раскрытия получаются на горизонтальных звеньях, лежащих на оси Ox и возрастают с увеличением числа звеньев. На момент окончания счета $\max(\nu_*)_z \approx 0,06 \div 0,04$. Происходит обводнение блочного массива, заключенного между левой и правой ‘квазиступенчатыми’ трещинами и трещинами, растущими по горизонтальной оси. С них в эту область прорастает множество дополнительных трещин – горизонтальных и вертикальных.

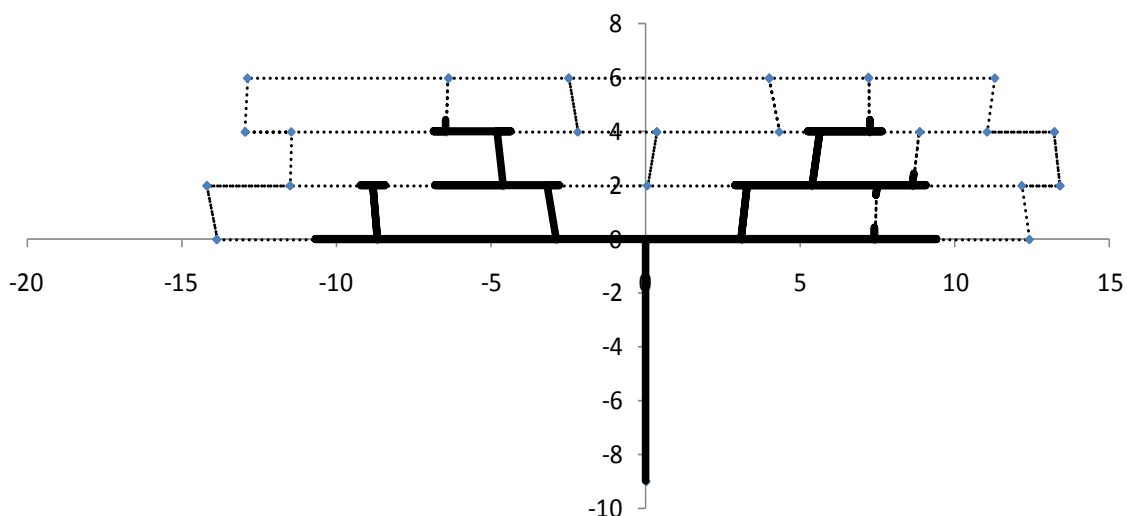


Рис. 3. Обводнение системы блоков

Закключение. Полученные результаты согласуются с данными работы [1], когда структура блочной среды приближается к регулярной. На основе проделанных расчетов можно сказать, что при $30^0 < \gamma - \alpha_0 < 70^0$ ($\gamma - \alpha_0$ - угол между направлением максимального сжатия и направлением слоистости) магистральная трещина имеет ступенчатую форму. С увеличением угла $\gamma - \alpha_0 > 70^0$ появляется возможность развития побочных зародышевых трещин вплоть до узловых точек и форма получаемой трещины гидроразрыва может существенно отличаться от ступенчатой. При $\gamma - \alpha_0 < 30^0$ развитие результирующей трещины будет идти по направлению напластования. Получено, что с увеличением отношения q/p в интервале $0,5 \leq q/p \leq 0,9$ форма итоговой трещины не меняется – растут одни и те же зародышевые трещины, но для их продвижения требуются большие значения предельного давления жидкости, а средние раскрытия звеньев трещины уменьшаются. В общем случае, максимальные и минимальные раскрытия звеньев трещины не коррелируют со значениями сжимающих напряжений на этих звеньях, вызванных внешним полем сжатия. При $q/p \rightarrow 1$ почти все зародышевые трещины развиваются. В предельном случае $q/p = 1$ появляется зона обводнения, которая ограничена двумя ступенчатыми трещинами и трещинами, расположенными на горизонтальной оси. В этой области развивается множество горизонтальных и вертикальных трещин, но замкнутых контуров не получается.

Работа выполнена по проекту ОНЗ РАН 3.1 и проекту № 11-05-00371 Российского фонда фундаментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мартынюк П. А., Шер Е. Н. Развитие трещины гидроразрыва в сжатом блочном массиве // ФТПРПИ. – 2010. – № 5.
2. Мартынюк П. А. Особенности развития трещин гидроразрыва в поле сжатия // ФТПРПИ. – 2008. – № 6.
3. Саврук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. – Киев: Наукова думка, 1981.

© П. А. Мартынюк, Е. Н. Шер, 2014

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФЛОТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ СВОЙСТВ ФИЗИЧЕСКИ СОРБИРУЕМОГО РЕАГЕНТА

Сергей Александрович Кондратьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий отделом комбинированных способов добычи и переработки горнорудного сырья, тел. (383)217-07-65, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Обсуждаются закономерности флотации несulfидных минералов оксигидрильными и катионными реагентами. Показано, что собирательная способность физической формы сорбции реагента проявляется на границе раздела «газ-жидкость» и не является селективной по отношению к разделяемым минералам. Для повышения качества разделения минералов с близкими поверхностными свойствами предложено использовать реагент, физическая форма сорбции которого формирует на поверхности воды пленку с малой величиной поверхностного давления.

Ключевые слова: флотация, физически и химически сорбируемые флотационные реагенты, поверхностное давление, извлечение, селективность.

IMPROVEMENT OF MINERAL SEPARATION IN FLOTATION DUE TO THE OPTIMIZED PROPERTIES OF PHYSICALLY ADSORBED REAGENT

Sergey A. Kondratiev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Department for Mineral Mining and Processing Combination Methods, tel. (383)217-07-65, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

The article analyzes mechanisms of nonsulfide mineral flotation using oxyhydril and cation reagents. It is shown that collecting ability of the physically adsorbed reagent shows itself at the particle–bubble interface and is unselective toward any of the minerals under separation. In order to improve separation of minerals having close surface properties, the author offers to use a reagent the physical sorption of which results in formation of low surface pressure film on the surface of the water.

Key words: flotation, physical sorption and chemical sorption of flotation agents, surface pressure, recovery, selectivity.

Цель настоящей работы показать, что одним из методов регулирования селективности флотационного процесса является изменение поверхностного давления пленки активных по отношению к границе раздела «газ-жидкость» форм реагента. Основные закономерности флотации катионными реагентами и олеиновой кислотой принципиально не отличаются. Для указанных реагентов требуются физическая и химическая формы его сорбции на минеральной поверхности, а максимальная собирательная способность реагента проявится, если физически сорбированный реагент обладает высокой активностью по отношению к границе раздела «газ-жидкость».

Олеиновая кислота и алифатические амины находятся в водных растворах в виде ионов, молекул, ионно-молекулярных ассоциатов. В зависимости от pH oleиновая кислота может существовать в растворе в различных формах: RCOOH , RCOO^- , $(\text{RCOO})_2\text{H}^-$, $(\text{RCOO})_2^{2-}$. Активными по отношению к границе раздела «газ–жидкость» являются $\text{RCOO})_2\text{H}^-$ и RCOOH . Заметная концентрация наиболее активной формы $(\text{RCOO})_2\text{H}^-$ находится в диапазоне pH $6 \div 10$, а наибольшее ее содержание приходится на область pH $7 \div 8$ (рис. 1, а) [1].

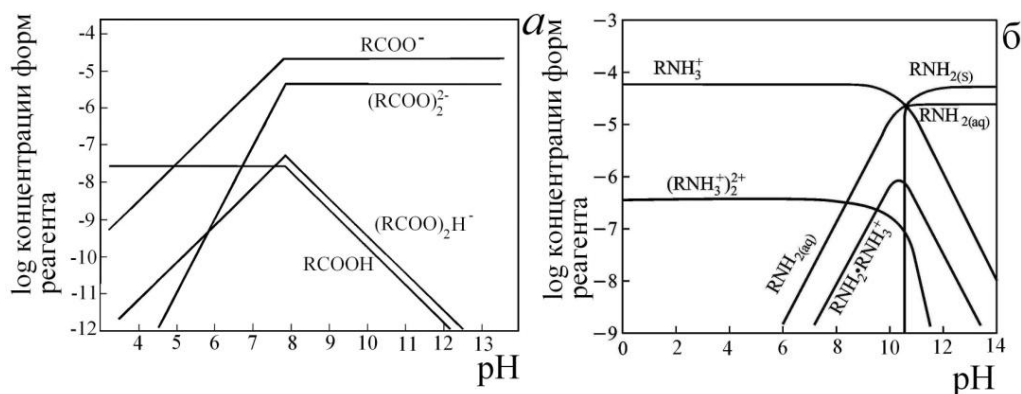


Рис. 1. Активность (концентрация) различных форм олеата – а и додециламина б – в растворе в зависимости от pH раствора при общей концентрации олеата $3 \cdot 10^{-5}$ и додециламина $5 \cdot 10^{-5}$ М

Характер изменения концентраций ионных и молекулярных компонентов додециламина ($5 \cdot 10^{-5}$ моль/л) в зависимости от pH представлен на рис. 1, б [2]. Растворимый реагент преимущественно находится в ионной RNH_3^+ форме до pH 10. Количество молекулярной формы амина RNH_2 , незначительное в кислой и нейтральной областях, существенно увеличивается в области pH близкой к 10. С увеличением содержания в растворе молекулярной формы формируются ионно-молекулярные ассоциаты [3]. В области pH 10 и более образуются коллоидные соединения $\text{RNH}_{2(\text{s})}$, которые выделяются в первую очередь на гидрофобизированных минералах. Смешанная пленка из ионов, молекул и ионно-молекулярных ассоциатов формируется при $\text{pH} > 9$.

Удаление жидкости из прослойки обусловлено двумя основными факторами: гидрофобностью поверхности, характеризующейся величиной отступающего краевого угла, и наличием поверхностно-активной формы физически закрепившегося собирателя. Гидрофобные поверхности, имеющие большую величину отступающего краевого угла, способны освободиться от жидкости в прослойке при отсутствии физической формы сорбции реагента. Отступление жидкости от места локального прорыва происходит самопроизвольно в результате гидрофобного вытеснения воды. Высота образовавшегося в момент прорыва мениска в этом случае соответствует толщине жидкой прослойки, находящейся между объектами взаимодействия, а его контактный угол находится в диапазоне динамических отступающих краевых углов. Влияние физической формы

сорбции отсутствует. Концентрация реагента, требуемая для извлечения минерала, в этом случае в ≈ 10 раз превосходит концентрацию, обычно применяемую в практике флотации.

При наличии на минеральной поверхности физически закрепившегося реагента требование высокой плотности его сорбции снимается. Жидкость удаляется в результате растекания указанной формы реагента по границе раздела «газ-жидкость» в момент локального прорыва прослойки. Утончение жидкой прослойки до толщины, при которой контактный угол будет равен отступающему динамическому углу, приведет к осушению минеральной частицы под пузырьком. Собирательная активность реагента определится его способностью к увлечению в совместное движение и удалению жидкости из прослойки.

Влияние активной формы олеиновой кислоты на флотируемость оценим на примере флюорита. На рис. 2 даются извлечение и сорбция карбоксильного собирателя $C_{17}H_{33}COOH$ флюоритом при различных значениях pH . Имеется выраженный максимум флотации флюорита в нейтральной среде, где концентрация $(RCOO)_2H^-$ максимальна.

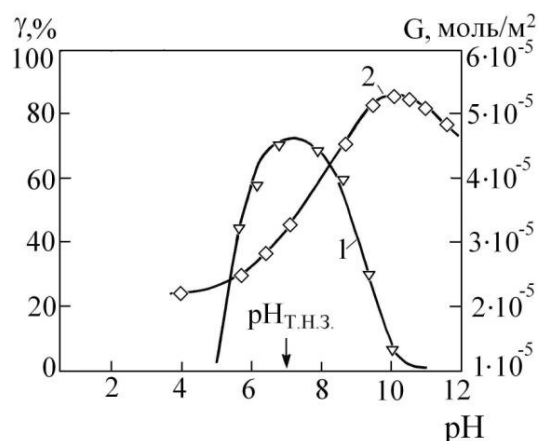


Рис. 2. Флотация флюорита (1) (исходная концентрация собирателя $3,2 \cdot 10^{-5}$ моль/л) и плотность сорбции реагента (2) (исходная концентрация $5,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л) в зависимости от pH [4]

Электрокинетический потенциал флюорита в кислой среде отрицательный. Повышение pH до 7 приводит к уменьшению его отрицательного значения до -2.62 мВ, которое сохраняется практически без изменения до pH 12. Увеличение pH свыше 8 приводит к снижению флотируемости флюорита несмотря на высокую концентрацию ионной формы и высокую плотность сорбции реагента. Падение флотируемости при pH более 8 связано с уменьшением концентрации $(RCOO)_2H^-$ и отсутствием эффекта физической формы сорбции.

Достаточно низкие концентрации Ca^{+2} ($10^{-4} \div 10^{-3}$ М) увеличивают диапазон pH флотируемости флюорита в основном за счет щелочной области. Увеличение флотируемости может быть связано с адсорбцией ионов кальция мине-

ральной поверхностью и увеличением положительного значения электрокинетического потенциала. Увеличение концентрации Ca^{+2} до $10^{-2} \div 10^{-1}$ М приведет к образованию в нейтральной и щелочной среде карбоксилата и подавлению флотации.

Влияние активной формы додециламина на флотируемость минералов оценим на примере кварца. Если pH превышает 8 формируются ионно - молекулярные ассоциаты $x(\text{RNH}_3^+) \cdot y(\text{RNH}_2)$, которые совместно с катионами RNH_3^+ сорбируются на отрицательно заряженной минеральной поверхности. Создаются благоприятные условия для реализации эффекта физической формы сорбции катионным реагентом. Высокое поверхностное натяжение пузырьков и сорбция минеральной поверхностью активных по отношению к границе раздела «газ-жидкость» ионно-молекулярных ассоциатов создают предпосылки для развития высокого поверхностного давления $\pi_0 = \sigma_{L-V} - \sigma_{Min}$, где σ_{Min} - минимальное поверхностное натяжение раствора додециламина. В момент локального прорыва прослойки ассоциаты, находящиеся на минеральной поверхности, под действием силы, обусловленной поверхностным давлением, растекаются по границе раздела «газ-жидкость» и увлекают последнюю в свое движение. В результате увлечения жидкости растекающейся пленкой ассоциатов $x(\text{RNH}_3^+) \cdot y(\text{RNH}_2)$ происходит осушение минеральной поверхности под пузырьком. Реагент, формирующий пленку с большим поверхностным давлением, активнее проявляет свои собирательные свойства, то есть поверхностная активность физической формы сорбции реагента коррелирует с его флотационно-собирательными качествами. На рис. 3 показано, что максимальное извлечение кварца приходится на область pH где поверхностное натяжение раствора додециламина минимально, а π_0 максимально. В виду малой исходной концентрации реагента осушение минеральной поверхности происходит при сравнительно небольшой ее гидрофобности.

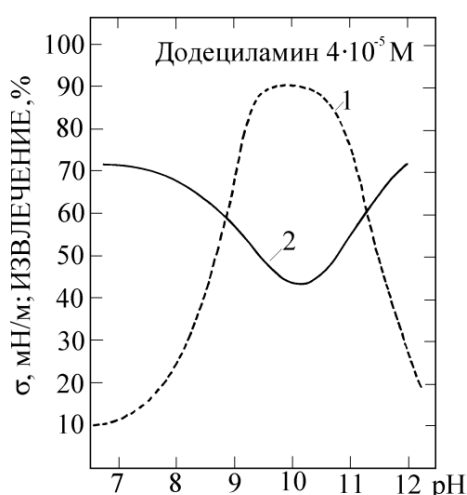


Рис. 3. Флотация кварца додециламином в зависимости от pH :
1 – извлечение; 2 – поверхностное натяжение [5]

В [6] приводятся сведения по флотации корунда (Al_2O_3) хлоридом додециламмония. Величина pH точки нулевого заряда минерала составляет 9,1 (рис. 4). Максимальное извлечение корунда наблюдается в районе $pH \sim 10,5$ [6]. Для указанного значения pH величина потенциала минеральной поверхности относительно изоэлектрического состояния составляет ~ -50 мВ [6], что создает благоприятные условия для ионно-электростатического взаимодействия положительно заряженных форм собирателя с минеральной поверхностью. В этой же области pH наблюдается максимальная концентрация наиболее активной на границе раздела «газ–жидкость» формы реагента $RNH_3^+ \cdot RNH_2$, а также нов RNH_3^+ , необходимых для предварительной гидрофобизации минерала. Снижение pH раствора до величины 9 и менее приводит к перезарядке поверхности минерала и созданию условий не благоприятных для ионно-электростатического взаимодействия, что приводит к резкому падению фотируемости. Повышение pH раствора до величины более 11 сохраняет условия благоприятные для ионно-электростатического взаимодействия, но концентрация наиболее активной формы реагента $RNH_3^+ \cdot RNH_2$, а также ионов RNH_3^+ снижается, что приводит к падению флотиремости корунда.

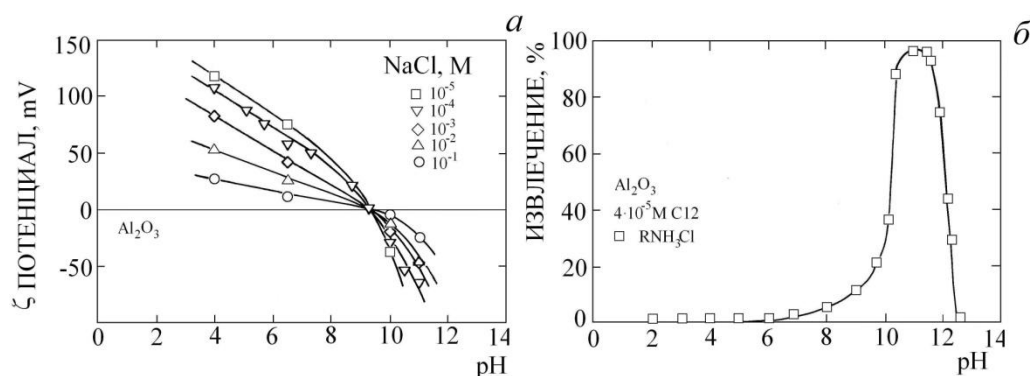


Рис. 4. ζ -потенциал (а) и извлечение (б) корунда в зависимости от pH раствора; концентрация хлорида додециламмония $4 \cdot 10^{-5}$ М [6]

Во всех рассмотренных случаях флотация минералов реализуется, если на минеральной поверхности имеются активные по отношению к границе раздела «газ-жидкость» формы реагента. В основном это физически сорбированный реагент способный переходить на указанную границу раздела в момент локального прорыва жидкой прослойки.

Принято считать, что разделение двух минералов, например с близкими поверхностными свойствами, может быть достигнуто только выбором реагента способного селективно гидрофобизировать требуемую минеральную поверхность. Такой подход не учитывает кинетические особенности формирования флотационного комплекса. Физическая форма сорбции реагента, обладающая активностью по отношению к границе «газ-жидкость», может оказать влияние на селекцию разделения минералов. Физически сорбированный реагент прояв-

ляет свои собирательные свойства на указанной границе раздела и вне зависимости от особенностей минеральной поверхности. Селективность разделения минералов реагентом с высокой активностью по отношению к границе раздела «газ-жидкость» будет уступать качеству разделения, достигаемому при использовании реагентов с низкой активностью. Эффект физической формы сорбции в удалении воды из прослойки будет значителен. Но по этой же причине качество концентрата будет невысокое, что является следствием проявления эффекта физической формы сорбции на границе раздела «газ-жидкость», а не на границе «минерал-раствор». Высокая флотационная активность физической формы сорбции увеличит извлечение минералов с малой гидрофобностью, сростков и вмещающих пород. Например, синтетические жирные кислоты с короткой углеводородной цепью являются более слабыми собирателями по сравнению с олеиновой кислотой, но обладают большим эффектом селективности. Избирательность действия реагента определится соотношением объемов жидкости, удаленных из прослойки за счет эффекта гидрофобизации минеральной поверхности и эффекта физической формы сорбции [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kulkarni R. D., Somasundaran P. Flotation chemistry of hematite/oleat system // *Colloids and Surfaces*. – 1980. – Vol. 1. – No. 3 – 4.
2. Somasundaran P., Wang Dianzuo. *Solution Chemistry: Minerals and Reagents*. – 2006. – Amsterdam: Elsevier. – P. 218.
3. Smith R. W., Akhtar S. Cationic flotation of Oxide and silicates / *Flotation*, M. C., Fuerstenau (Ed.), A. M. Gaudin Memorial Volume, 1976. – Vol. 1, AIME Inc., New York, P. 87 –116.
4. Marinakis K. I., Shergold H. L. The mechanism of fatty acid adsorption in the presence of fluorite, calcite and barite // *International Journal of Mineral Processing*. – 1985. – Vol. 14. – Issue 3.
5. Finch J. A., Smith G. W. Dynamic surface tension of alkaline dodecylamine solutions // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1973. – Vol. 45. – No.1. – P. 81 – 91.
6. Fuerstenau D.W., Pradip. Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals // *Advances in colloid and interface science*. – 2005. – V. 114 – 115. – P. 9 – 26.
7. Кондратьев С. А. Активность и селективность действия карбоновых кислот, используемых в качестве флотационных реагентов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2012. – № 6. – С. 116 – 125.

© С. А. Кондратьев, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Р. К. Камаров, А. К. Турсунбаева, Ж. З. Толеубекова, А. И. Раскельдинов.</i> Параметры технологии подавления серосодержащих газов с использованием физико-химических методов	3
2. <i>С. А. Ефименко, О. С. Ефименко, В. С. Портнов, Р. К. Камаров, Ж. З. Толеубекова, Г. К. Макишев.</i> О возможности реализации многофункциональной рентгенора-диометрической системы рудоподготовки для шахт ПО «Жезказганцветмет»	11
3. <i>Е. К. Нуржумин, Ж. З. Толеубекова, Р. К. Камаров, Д. В. Мозер, Т. С. Омурзаков.</i> Оработка приконтурных участков залежей сложно-структурных месторождений и способы ее оценки.....	23
4. <i>В. В. Татарников, Н. Г. Загоруйко.</i> Алгоритм заполнения пробелов и обнаружения ошибок в геолого-промысловых данных	31
5. <i>Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. В. Патутин, С. В. Сердюков.</i> Физическое моделирование метода барьерного экранирования.....	37
6. <i>В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова.</i> Прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния предохранительного целика под водоносным горизонтом	42
7. <i>Л. Н. Гахова.</i> Термонапряженное состояние многослойного сталежелезобетонного водовода в составе конструкции гидротехнического сооружения	48
8. <i>А. В. Патутин, Т. В. Шилова, С. В. Сердюков.</i> Устройство направленного гидроразрыва массива горных пород и его стендовые испытания.....	53
9. <i>Б. Н. Смоляницкий, Б. Б. Данилов, Е. В. Рубцова.</i> Об определении основных параметров буровой установки с обратной циркуляцией очистного агента.....	57
10. <i>А. И. Чанышев, И. М. Абдулин.</i> Решение задачи Л. А. Галина в постановке Коши	63
11. <i>А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова.</i> Численно-аналитическое исследование влияния неоднородностей среды на процессы сжатия при статическом и динамическом нагружениях	69
12. <i>Г. Р. Бочкарев, Г. И. Пушкарёва, К. А. Коваленко.</i> Применение природных минералов в решении экологических проблем предприятий горно-промышленного комплекса.....	74
13. <i>Г. А. Кремлев, А. В. Савченко, Ю. В. Погарский.</i> Разработка скважинного виброисточника гармонических колебаний с регулируемой частотой	80

14. Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко. Решение задачи стационарной фильтрации несмешивающихся флюидов в трещиновато-блочной структуре с учетом капиллярных сил	85
15. А. И. Чанышев, Л. Л. Ефименко, О. А. Лукьяшко. Жесткопластическая модель первоначально анизотропной среды в задаче о ее сдвиге жестким отвалом	92
16. Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин. Оценка возможности уменьшения радиуса поворота рабочего органа при направленном бурении	98
17. А. И. Чанышев, М. Н. Петров. Задача об определении положения динамического источника возмущений по данным измерений смещений на поверхности (плоская деформация)	103
18. В. Г. Качальский. Программно-техническое обеспечение экспериментальных исследований НДС массива горных пород методом параллельных скважин	109
19. Н. И. Александрова, М. П. Варыгина, Е. Н. Шер. Моделирование распространения сейсмических волн по поверхности блочного породного массива при сосредоточенном импульсном нагружении	115
20. А. А. Ретин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карнов. Создание техники для бурения протяженных исследовательских скважин	121
21. Т. А. Киряева. Деструкция и интенсивность саморазрушения угольного пласта	126
22. А. В. Леонтьев, Т. В. Лобанова. Деформационный мониторинг движений породного массива на железорудных месторождениях Горной Шории	133
23. В. Е. Миренков, А. А. Красновский. К вопросу управления горным давлением при ведении очистных работ	139
24. Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев, О. А. Пашина. Разработка и создание гидромолотов для исполнительных органов горных и строительных машин	145
25. С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, В. М. Усольцев. Повышение эффективности вибромашин при выпуске горной массы из аккумулирующих емкостей	151
26. Б. Б. Данилов, Д. А. Воротников. Критерии выбора принципиальной схемы погружного пневмоударного механизма при направленном бурении скважин	157
27. В. И. Ростовцев. Об эффекте интенсифицирующих энергетических воздействий на процессы переработки труднообогатимого минерального сырья	163
28. Г. И. Кулаков, И. А. Рыженков, В. И. Щелканова, В. А. Шаповалов. Прогнозирование обрушений в призабойной зоне подготовительной горной выработки	169
29. В. Ф. Юшкин. О переходе сейсмозрывной волны от скальных пород в осадочный чехол	174

30. <i>А. В. Савченко, Е. Н. Чередников, М. Н. Цупов.</i> Влияние депрессионно-сейсмического воздействия на призабойную зону продуктивного пласта	180
31. <i>В. М. Серяков.</i> О влиянии упругопластического деформирования межслоевых контактов на напряженное состояние вмещающих пород в окрестности выработанного пространства	184
32. <i>В. А. Скрицкий.</i> Повышение безопасности и эффективности отработки пологих угольных пластов подземным способом за счет попутной добычи и утилизации метана	189
33. <i>А. С. Танайно.</i> Связь прочности на одноосное сжатие терригенных горных пород с их структурой (на примере вмещающих пород Кузбасса)	194
34. <i>А. П. Тапсиев, В. А. Усков.</i> Развитие систем разработки для условий таликовой зоны Нежданинского месторождения	202
35. <i>Н. А. Мирошниченко, А. В. Панов.</i> Метод оценки пластового давления по геодезическим данным при отработке месторождений углеводородов	207
36. <i>С. Б. Стажевский, А. А. Крамаджян, Е. П. Русин.</i> Особенности взаимодействия гибкого элемента анкера с грунтовым основанием	213
37. <i>С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, В. М. Усольцев, А. В. Морозов.</i> Перспективные направления использования вибротехники на карьерах	219
38. <i>И. О. Шахторин.</i> Буровой инструмент для горных и строительных работ	224
39. <i>В. Н. Лабутин.</i> Комбинированный способ разрушения при выемке угольных пластов с породными включениями	229
40. <i>И. В. Тищенко, В. В. Червов, А. И. Горелов.</i> Повышение частоты ударов источника силовых импульсов при проходке скважины в грунтовом массиве	235
41. <i>В. Н. Белобородов, А. А. Репин, А. К. Ткачук, В. Н. Карпов.</i> Перспективы создания длинноходовых автономных ударных механизмов двойного действия для строительства, ЖКХ, сейсморазведки и горного дела	241
42. <i>Д. В. Барышников.</i> Определение сдвижений закладочного массива разрезного слоя после его подработки	247
43. <i>М. Н. Цупов, А. В. Савченко.</i> Влияние сейсмических событий на дебет жидких и газообразных полезных ископаемых	252
44. <i>П. А. Мартынюк, Е. Н. Шер.</i> Особенности развития гидроразрыва в сжатом квазирегулярном блочном массиве	257
45. <i>С. А. Кондратьев.</i> Повышение качества флотационного разделения минералов методом оптимизации свойств физически сорбируемого реагента	263

CONTENTS

1. R. K. Kamarov, A. K. Tursunbaeva, J. Z. Toleubekova, A. I. Ras-keldinov. Parameters of sulfur gas suppression using physicochemical methods	3
2. S. A. Efimenko, O. S. Efimenko, V. S. Portnov, R. K. Kamarov, J. Z. Toleubekova, G. K. Makishev. About possibility of multifunctional x-ray-diometrical system f ore preparation usage on the mines of jsc «Zhezkazgancvetmet»	11
3. E. K. Nurzhumin, J. Z. Toleubekova, R. K. Kamarov, D. V. Mozer, T. S. Omurzakov. Mining in marginal areas of complicated-structure ore bodies and the ore body structure complexity evaluation	23
4. V. V. Tatarnikov, N. G. Zagoruiko. Gap completion and error detection algorithm or the field-geological data	31
5. T. V. Shilova, L. A. Rybalkin, A. V. Patutin, S. V. Serdyukov. Physical modeling of barrier shielding	37
6. V. D. Baryshnikov, L. N. Gakhova. Predictive estimate of stress–strain state of safety pillar under aquifer	42
7. L. N. Gakhova. Thermal stress of multi-layer steel-and-concrete conduit in the structure of waterworks	48
8. A. V. Patutin, T. V. Shilova, S. V. Serdyukov. Directional hydraulic fracturing equipment and its stand test	53
9. B. N. Smolyanitsky, B. B. Danilov, E. V. Rubtsova. Determination of basic parameters of a drill rig with reverse scavenging	57
10. A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin. Galin’s problem in the Cauchy formulation	63
11. A. I. Chanyshev, O. E. Belousova. Computational and analytical study of the effect of heterogeneity on the static and dynamic compression of a medium	69
12. G. R. Bochkarev, G. I. Pushkareva, K. A. Kovalenko. Usage of natural minerals in ecological problem handling at mines and processing plants	74
13. G. A. Kremlev, A. V. Savchenko, Yu.V. Pogarsky. Downhole source of harmonic vibrations with adjustable friction	80
14. D. S. Evstigneev, A. V. Savchenko. Solution of the problem on stationary filtration of immiscible fluids in a fissured blocky structure, considering capillary forces	85
15. A. I. Chanyshev, L. L. Efimenko, O. A. Lukyashko. Plastic-rigid model of the initially anisotropic medium in the problem on shearing of the medium by the rigid dozer blade	92

16. <i>B. B. Danilov, D. O. Cheshchin</i> . Evaluation of the guided drilling member turn tightening potential	98
17. <i>A. I. Chanyshhev, M. N. Petrov</i> . Problem on location of dynamic excitation source by using surface displacement measurements	103
18. <i>V. G. Kachalsky</i> . Software and equipment support of field researches of rock mass stress–strain state by the method of parallel hole drilling	109
19. <i>N. I. Aleksandrova, M. P. Varygina, E. N. Sher</i> . Simulation of seismic wave propagation over the surface of a blocky rock mass under the pin impulsive loading	115
20. <i>A. A. Repin, S. E. Alekseev, V. N. Karpov</i> . Long investigation hole drilling equipment	121
21. <i>T. A. Kiryaeva</i> . Coal bed self-destruction and the destruction rate	126
22. <i>A. V. Leontiev, T. V. Lobanova</i> . Deformation monitoring in iron ore bodeis and host rocks in Gornaya Shoria.....	133
23. <i>V. E. Mirenkov, A. A. Krasnovsky</i> . Ground control in stoping	139
24. <i>L. V. Gorodilov, V. G. Kudryavtsev, O. A. Pashina</i> . Development and design of hydraulic hammers for executive elements of mining and construction machines	145
25. <i>S. Ya. Levenson, L. I. Gendlina, V. M. Usoltsev</i> . Gain in performance of vibration machines in rock discharge from accumulating tanks.....	151
26. <i>B. B. Danilov, D. A. Vorotnikov</i> . Selection criteria for basic diagram of downhole air-percussion machine in directional hole drilling	157
27. <i>V. I. Rostovtsev</i> . Stimulating energy effect on the rebellious mineral processing	163
28. <i>G. I. Kulakov, I. A. Ryzhenkov, V. I. Shchelkanova, V. A. Shapovalov</i> . Prediction of cave-ins in the development heading face	169
29. <i>V. F. Yushkin</i> . Transition of seismic blast wave from solid rocks to sedimentary mantle.....	174
30. <i>A. V. Savchenko, E. N. Cherednikov, M. N. Tsupov</i> . Depression–seismic effect on bottom-hole formation zone.....	180
31. <i>V. M. Seryakov</i> . Effect of elastoplastic deformation at bedding interfaces on stress state of enclosing rocks around mined-out void.....	184
32. <i>V. A. Skritsky</i> . Improved safety and efficiency of underground flat coal mining by means of collateral methane recovery and utilization.....	189
33. <i>A. S. Tanaino</i> . Correlation of uniaxial compression strength and structure in terrigenous rocks (in terms of country rock mass in Kuzbass).....	194
34. <i>A. P. Tapsiev, V. A. Uskov</i> . Development of mining methods for the thawed zone conditions of the Nezhdaninskoe gold deposit	202
35. <i>N. A. Miroshnichenko, A. V. Panov</i> . Reservoir pressure evaluation in hydrocarbon accumulation development based on geodetic data	207
36. <i>S. B. Stazhevsky, A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin</i> . Features of ground anchor flexible element interaction with soil base.....	213

37. <i>S. Ya. Levenson, L. I. Gendlina, V. M. Usoltsev, A. V. Morozov.</i> Use perspectiveness of vibration machines in open pit mines.....	219
38. <i>I. O. Shakhtorin.</i> Drilling tools for mining and construction.....	224
39. <i>V. N. Labutin.</i> Combined breaking technology for coal with rock intercalations.....	229
40. <i>I. V. Tishchenko, V. V. Chervov, A. I. Gorelov.</i> Increased blow fre- quency of power pulse generator in soil drilling.....	235
41. <i>V. N. Beloborodov, A. A. Repin, A. K. Tkachuk, V. N. Karpov.</i> Prospects for designing long-stroke self-reacting double action devices for construction, municipal housing, seismic exploration and mining	241
42. <i>D. V. Baryshnikov.</i> Determination of displacement of undermined backfilled stope on access level.....	247
43. <i>M. N. Tsupov, A. V. Savchenko.</i> Seismic effect on fluid and gas mineral yield.....	252
44. <i>P. A. Martynyuk, E. N. Sher.</i> Features of hydraulic fracturing in a quasi-regular block rock mass in compression	257
45. <i>S. A. Kondratiev.</i> Improvement of mineral separation in flotation due to the optimized properties of physically adsorbed reagent	263

Научное издание

X Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

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

Т. 4

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 27.03.2014. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 15,98. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГГА
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.