МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

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

Т. З

Сборник материалов

Новосибирск СГУГиТ 2015

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 РАН, 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 СГУГиТ, Новосибирск В. А. Середович Кандидат геолого-минералогических наук, учёный секретарь ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск С. П. Зайцев

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. Т. 3. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 304 с.

ISBN 978-5-87693-799-5 (т. 3) ISBN 978-5-87693-796-4 ISBN 978-5-87693-795-7

В сборнике опубликованы материалы XI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015», 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 СГУГиТ Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-87693-799-5 (т. 3) ISBN 978-5-87693-796-4 ISBN 978-5-87693-795-7

© СГУГиТ, 2015

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЛОСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ В ПОСТАНОВКЕ КОШИ

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

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

На примере численного конечно-разностного решения задачи о нахождении структуры массива пород и его напряженно-деформированного состояния по известным одновременно значениям вектора напряжений Коши и вектора смещений на его границе в виде плоскости показывается перспективность предлагаемого метода для решения подобных задач в других случаях (условия заданы на поверхности выработки). Приводится сравнение численного и известного аналитического решений.

Ключевые слова: напряжения, деформации, упругость, конечно-разностная схема, задача Коши.

NUMERICAL SCHEME AND IMPLEMENTATION FOR 2D AND 3D STATIC CAUCHY'S PROBLEMS OF ELASTICITY

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, Deputy Director for Science, tel. (383)335-97-50, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Ilgizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)335-97-50, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Larisa L. Efimenko

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

In terms of the finite-difference solution to the problem on structure, stresses and strains of rock mass by the known values of Cauchy's stress vector and displacement vector at the boundary of the rock mass represented by a plane, the authors illustrate applicability of the problem to solving

the other similar problems (conditions are set at the surface of an excavation). The numerical results and the known analytical solution are compared.

Key words: stresses, strains, elasticity, finite-difference scheme, Cauchy's problem.

Решается задача о нагружении полуплоскости некоторыми усилиями τ_{xy}, σ_y . Причем на этой поверхности одновременно с нагрузкой измеряются еще и смещения u_x, u_y . Требуется по этим данным определить НДС самой полуплоскости. Если в ней есть какие-то дефекты в виде сосредоточенных сил, отверстий, включений, то дополнительно ставится еще и другая задача – определить их положения, интенсивности внутренних источников возмущений. С математической точки зрения задача выглядит так. Есть система координат xOy, изображенная на рис. 1.



Рис. 1. Исследуемая область деформирования

Есть граница полуплоскости y = 0. На этой границе задаются четыре независимые друг от друга функции:

$$\tau_{xy} = f_1(x), \ \sigma_y = f_2(x), \ u_x = f_3(x), \ u_y = f_4(x).$$
(1)

Внутри полуплоскости во всех ее точках справедливы уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \end{cases}$$
(2)

Кроме того в каждой точке полуплоскости предполагается выполненным закон Гука:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1 - v^2}{E} \sigma_x - \frac{v(1 + v)}{E} \sigma_y, \\ \varepsilon_y = -\frac{v(1 + v)}{E} \sigma_x + \frac{1 - v^2}{E} \sigma_y, \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{2\mu}. \end{cases}$$
(3)

(рассматривается плоско деформированное состояние полуплоскости).

К соотношениям (1) - (3) необходимо добавить еще соотношения Коши:

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

/

Задача найти НДС полуплоскости и ее содержимое.

Отметим, что здесь при решении задачи возможно использовать формулы Колосова–Мусхелишвили [1, 2]. Однако ниже рассматривается конечноразностная реализация решения задачи с целью обобщения полученной схемы на трехмерный случай деформирования, где аналитических решений нет.

Говоря об актуальности рассматриваемой постановки задачи, следует сказать, что эта постановка в той или иной мере присутствует во многих проблемах геологии, геофизики, геомеханики в связи с поиском месторождений полезных ископаемых, определением структуры Земли, с обеспечением безопасности ведения горных работ и т.д.

Перепишем (1) - (4) в следующем виде. Введем обозначения:

$$\hat{\sigma}_x = \frac{1+\nu}{E}\sigma_x, \ \hat{\sigma}_y = \frac{1+\nu}{E}\sigma_y, \ \hat{\tau}_{xy} = \frac{1+\nu}{E}\tau_{xy}.$$

Тогда (3) можно перегруппировать как

$$\left|\frac{\partial u_{y}}{\partial y} = \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)}\hat{\sigma}_{y} - \frac{\nu}{1-\nu}\frac{\partial u_{x}}{\partial x},\right|$$
(5)

$$\left|\frac{\partial u_x}{\partial y} = 2\hat{\tau}_{xy} - \frac{\partial u_y}{\partial x}\right|,\tag{6}$$

$$\left[\hat{\sigma}_{x} = \frac{1-\nu}{1-2\nu}\frac{\partial u_{x}}{\partial x} + \frac{\nu}{1-2\nu}\frac{\partial u_{y}}{\partial y}\right]$$
(7)

Из (2) при этом следует

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{\tau}_{xy}}{\partial y} = -\frac{\partial \hat{\sigma}_x}{\partial x}, \\ \frac{\partial \hat{\sigma}_y}{\partial y} = -\frac{\partial \hat{\tau}_{xy}}{\partial x}. \end{cases}$$
(8)

Будем рассматривать прямоугольник со сторонами $x = \pm a$, y = 0, y = -b (a, b > 0). Введем сеточные функции $\hat{\sigma}_{ij}$, u_{ij}^x , u_{ij}^y .

Поскольку на границе y = 0 заданы функции $u_x, u_y, \tau_{xy}, \sigma_y$, то по этим данным находим производные вдоль границы:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^x - u_i^x}{h_x}, \quad \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^y - u_i^y}{h_x}.$$
(9)

По заданным значениям $\hat{\sigma}_y$, $\hat{\tau}_{xy}$ на границе y = 0 и через полученные производные (9) с помощью (5), (6) находим значения производных $\partial u_y / \partial y$, $\partial u_x / \partial y$.

Используя разложения

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{u_{-j}^y - u_{-j-1}^y}{h_y}, \ \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{u_{-j}^x - u_{-j-1}^x}{h_y}, \tag{10}$$

находим значения функций u_x , u_y на слое $y = -h_y$ (j = 0).

Зная $\partial u_y / \partial y$ на границе y = 0 по формуле (7) находим $\hat{\sigma}_x$ на границе y = 0. Далее используем (8). По этим данным аналогично (10) находим $\hat{\tau}_{xy}, \hat{\sigma}_y$ на слое $y = -h_y$. На слое $y = -h_y$ становятся известными смещения u_x, u_y , напряжения $\hat{\tau}_{xy}, \hat{\sigma}_y$. Ситуация таким образом повторяется. Производится спуск еще на один шаг h_y по координате у вниз.

Замечание. В (9) производные $\partial u_x / \partial x$, $\partial u_y / \partial x$, относятся к точке *i*. Отсюда следует, что в силу определения (9), эти производные не вычисляются в точке *i*=*N*. Аналогично не вычисляются производные $\partial \hat{\tau}_{xy} / \partial y$, $\partial \hat{\sigma}_y / \partial y$. Это означает, что не вычисляются значения функций u_x , u_y , τ_{xy} , σ_y на слое $y = -h_y$ при *i*=*N*. Т.е. с каждым понижающим шагом по *y* сужается область значений по *x*. Поэтому для того, чтобы «опуститься» глубоко вниз по координате *y* необходимо иметь довольно широкую область «захвата» по оси *x* при *y*=0.

В качестве проверки расчетной схемы использовалось аналитическое решение, полученное в [3]. Это решение при граничных условиях

$$\sigma_y = 0, \ \tau_{xy} = 0, \ u_x = \frac{Ax}{x^2 + b^2}, \ u_y = \frac{AH}{x^2 + b^2},$$

где A, H, b – некоторые константы, характеризующие распределение смещений u_x, u_y на указанной границе, представлено в [3]. В безразмерном виде

$$\frac{A}{b^2} = \hat{A}, \quad \frac{x}{b} = \hat{x}, \quad \frac{y}{b} = \hat{y}, \quad \frac{u_x}{b} = \hat{u}_x, \quad \frac{u_y}{b} = \hat{u}_y, \quad \frac{H}{b} = \hat{H},$$
$$\hat{\alpha} = \frac{\alpha}{b^2} = \hat{x}^2 - \hat{y}^2 + 1, \quad \beta = 2xy, \quad \gamma = x^2 + y^2 + 6yH + 3b^2, \quad \tau = \hat{x}^2 + \hat{y}^2 + 2\hat{y}\hat{H} + 1,.$$

решение имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_{x} + \hat{\sigma}_{y} = \frac{4A}{1+\aleph} \left\{ -\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2}} + 2\frac{(1+\hat{H}\hat{y})(\hat{\alpha}^{2} - \hat{\beta}^{2}) - 2\hat{H}\hat{x}\hat{\alpha}\hat{\beta}}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{2}} \right\}, \\ \hat{\sigma}_{y} - \hat{\sigma}_{x} = \frac{4\hat{A}}{1+\aleph} \left\{ \frac{\hat{\gamma}(\hat{\alpha}^{2} - \hat{\beta}^{2})}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{2}} - \frac{4\hat{\tau}\hat{\alpha}(\hat{\alpha}^{2} - 3\hat{\beta}^{2})}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{3}} \right\}, \\ \tau_{xy} = \frac{4\hat{A}\hat{\beta}}{1+\aleph} \left\{ -\frac{\hat{\alpha}\hat{\gamma}}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{2}} - \frac{2\hat{\tau}(\hat{\beta}^{2} - 3\hat{\alpha}^{2})}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{3}} \right\}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{x} = \frac{\hat{A}\hat{x}}{1+\aleph} \left\{ \frac{\Re\hat{\tau} - 6\hat{y}\hat{H} + \hat{\alpha}^{2} - 2\hat{y}^{2}}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{2}} + 8\hat{y}\frac{[(\hat{H} + 2\hat{y}) + \hat{H}(\hat{x}^{2} + \hat{y}^{2})]\hat{\alpha}}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{2}} \right\}, \\ u_{y} = \frac{\hat{A}}{1+\aleph} \left\{ \frac{\Re[(\hat{y} + \hat{H})\hat{\alpha} - \hat{x}\hat{\beta}] + 3\hat{H}\hat{\alpha} + \hat{y}(3\hat{x}^{2} - \hat{y}^{2} + 1)}{\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2}} - \frac{2[(\hat{H} + 2\hat{y}) + \hat{H}(\hat{x}^{2} + \hat{y}^{2})](\hat{\alpha}^{2} - \hat{\beta}^{2})}{(\hat{\alpha}^{2} + \hat{\beta}^{2})^{2}} \right\}. \end{cases}$$

При этом граничные условия при $\hat{y} = 0$ переписываются в виде:

$$\hat{\sigma}_{y} = 0, \ \hat{\tau}_{xy} = 0, \ \hat{u}_{x} = \frac{\hat{A}\hat{x}}{\hat{x}^{2}+1}, \ \hat{u}_{y} = \frac{\hat{A}\hat{H}}{\hat{x}^{2}+1}.$$

В работе дается сравнение численного и аналитического решений на каждом шаге по у и по координате *x*. Показывается приемлемость излагаемого метода решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусхелишвили Н.Н. Некоторые основные задачи математической теории упругости, Москва, 1966г., 708 с.

2. Шваб А.А. Некорректные статические задачи теории упругости // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 6. – С. 98-106.

3. Чанышев А.И., Вологин Д.А. Определение напряженно-деформированного состояния и дефектности массива пород по данным измерений смещений на его поверхности. Ч. 1 // ФТПРПИ. – 2011. – № 4, С. 3-11.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Л. Л. Ефименко, 2015

УДК 539.3.01:622.834

КОНТРОЛЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ КРОВЛИ ОТРАБАТЫВАЕМОГО БЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБИННЫХ РЕПЕРОВ^{*}

Василий Дмитриевич Барышников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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: vbar@misd.nsc.ru

Дмитрий Васильевич Барышников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния массива горных пород, тел. (383)217-05-15, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

Показана схема размещения наблюдательных станций для оценки сдвижений рудного массива в кровле отрабатываемого блока. Приведены результаты послойных смещений кровли в процессе выемки запасов с применение слоевой нисходящей системы разработки с твердеющей закладкой.

Ключевые слова: скважинный репер, наблюдательная станция, нисходящая система разработки, смещения, оседания.

MONITORING ROOF SUBSTIENCE IN EXTRACTION ROCK BLOK USING DEEP-SEATED PLUGS

Vasiliy D. Baryshnikov

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

Dmitriy V. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Laboratory for Diagnostics of Mechanical Condition of Rocks, tel. (383)217-05-15, e-mail: vbar@misd.nsc.ru

The article describes pattern of subsidence monitoring points in the roof of an extraction block. The layer-by-layer values of roof subsidence in the course of top-down slice mining with so-lidifying backfill are presented.

Key words: Roof plug, survey point, to-down mining, displacement, subsidence.

Ведение горных работ под несдреннированным водоносным комплексом осуществляется под защитой предохранительного целика, предотвращающего прорыв рассолов в подземные горные выработки. Для обеспечения безопасных

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке института «Якутнипроалмаз» АК «Алроса».

условий отработки месторождения необходим обязательный гидрогеомеханический мониторинг (ГГМ) состояния целика, осуществляемый по специальному проекту, согласованному с Ростехнадзором РФ.

Отработка подкарьерных запасов блока 5 рудника «Интернациональный» АК «Алроса» осуществляется под Метегеро-Ичерским водоносным комплексом (МИВК) с применением слоевой нисходящей системы разработки с твердеющей закладкой. Граница безопасного ведения очистных работ, установленная на отм.–190 м, расположена на 60 м ниже подошвы МИВК (отм.–130 м).

Для контроля состояния подрабатываемого блоком 5 рудного массива в пределах границы опасной зоны разработан проект гидрогеомеханического мониторинга [1]. Составной частью проекта является система геомеханического мониторинга, поэтапная реализация которой предусматривает получение исходной информации о напряженном состоянии и механических свойствах подкарьерной толщи пород, их изменениях в процессе развития горных работ путем проведения наблюдений за сдвижением подработанного рудного и закладочного массивов и контроля их нарушенности в границах опасной зоны [2]. Полученная информация позволит уточнить параметры расчетной геомеханической модели для численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) подкарьерного массива с последующей ее корректировкой по данным наблюдений за сдвижениями горных пород для повышения достоверности прогноза состояния целика в процессе и после отработки блока.

Учитывая тот факт, что формируемый закладочный массив верхней части блока 5 является упором оставленного под МИВК предохранительного целика, его состояние будет существенным образом зависеть от развития процесса сдвижений искусственного массива. В этой связи в состав мониторинга включены также наблюдения за сдвижением закладочного массива вблизи границы предохранительного целика.

При организации геомеханического мониторинга предусмотрено использования комплекса инструментальных и визуальных методов наблюдений. Инструментальные наблюдения осуществляются по схеме типовых станций: профильных линий (ПЛ), станций глубинных реперов (РС) и скважин визуальных наблюдений за разрушением их контура (СВ).

На рис. 1 приведена схема расположения станций в слое 19 блок 5: PC2–4, CB4–5, ПЛ1. Визуальные наблюдения в скважинах на предмет образования техногенной нарушенности их контура и образования техногенных трещин в целике осуществлялись с использованием скважинного эндоскопа.

Наблюдения по схеме профильных линий проводились путем передачи высотной отметки от опорного репера, установленного вне зоны влияния очистных работ, на рабочие репера в кровле и почве специально пройденной выработки в закладке слоя 19. По результатам нивелирования определяются осадки закладочного массива относительно исходного положения реперов и кондукторов реперных станций.

Станции глубинных реперов применяются для измерения смещений породного и искусственного массивов по установленным в скважинах на заданных удалениях от контура выработки (кондуктора) реперам. Передача смещений от реперов относительно кондуктора осуществляется с использованием жесткой связи (стальные стержни).



Рис. 1. Схема расположения станций в слое 19 блока 5

Приведем некоторые результаты наблюдений в процессе отработки верхнего подэтажа блока 5. На рис. 2 показаны вертикальные смещения по PC3, а на рис. 3 – зоны техногенной нарушенности по CB4.



Рис. 2. Смещения реперов относительно устья скважины на станции РСЗ



Рис. 3. Состояние контуров скважины СВЗ на глубине 4.5 м (а), 9.5 (б) и 25.1 м (в)

Анализ результатов наблюдений показал следующее:

1. По всем наблюдательным скважинам отмечены техногенные разрушения контуров, в т.ч. обнаружены серии субгоризонтальных трещин (см. рис.3в); на контакте «закладка–руда» имеет место наличие пустот (рис.3а), а в глубине массива – разрушения контура (рис.3б).

2. Максимальная глубина открытых трещин по РС4 составила 15 м.

3. По глубинным реперам, оборудованным в скважинах с интервалом через 5 м до глубин 20 м (PC2), 30 м (PC3) и 35 м (PC4) от кровли слоя 19, установлены:

• поинтервальные смещения рудного массива целика, максимальные значения смещения отмечаются на РСЗ (см. рис. 2);

• границы зон уплотнения и разуплотнения в целике: смещения рудного массива в сторону сжатия зарегистрированы на интервале 0÷10 м, а в сторону растяжения – 15÷30 м от контура кровли (см. рис. 4);

• процесс сдвижения рудного массива в целике продолжается более 2-х лет с момента прекращения очистных работ в блоке 5.

4. Наблюдения за осадкой реперов профильной линии в выработке слоя 19 показали, что процесс сдвижений закладочного массива продолжается, а максимальная осадка составила 20 мм (рис. 5)









Заключение:

1. Получена информация по размерам зон разрушений и активного деформирования рудного массива предохранительного целика, использование которой позволяет уточнить параметры расчетной модели, необходимой для прогноза его состояния в процессе последующей отработки подкарьерных запасов.

2. Результаты натурных наблюдений текущего геомеханического состояния предохранительного целика показали, что при проектной мощности 60 м зона неупругих деформаций не превышает 32–35 м. Поэтому его состояние на текущий момент не вызывает опасений по условиям поступления рассолов из МИВК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рабочий проект АК «Алроса» (ЗАО). Рудник «Интернациональный». Гидрогеомеханический мониторинг состояния предохранительного целика под метегеро-ичерским водоносным комплексом. (РП-805-ПЗ). – Мирный, Белгород, Новосибирск. – 2006.

2. Барышников В.Д., Барышников Д.В. Организация и проведение наблюдений за сдвижениями закладочного массива при его подработке. // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2008 – № 12.

© В. Д. Барышников, Д. В. Барышников, 2015

УДК 539.3.01:622.834

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ ПОД ВОДОНОСНЫМ КОМПЛЕКСОМ^{*}

Василий Дмитриевич Барышников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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 прогнозная оценка деформаций подготовительных выработок в окрестности отрабатываемого под водоносным комплексом блока № 4 рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА». Приводятся величины сдвижений рудного и породного массивов в зоне влияния очистных работ при выемке запасов блока.

Ключевые слова: водоносный комплекс, предохранительный целик, напряженнодеформированное состояние, оседание, смещение.

ROCK MASS DEFORMATION PREDICTION IN MINING UNDER AQUIFER

Vasily D. Baryshnikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., 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 data, the authors predict deformation in development headings in block no. 4 under an aquifer in Internationalny Mine, ALROSA. The values of subsidence of ore body and rock mass in the zone of influence of stoping are given.

Key words: Aquifer, protective pillar, stress-strain state, subsidence, displacement.

Отработка подкарьерных запасов на руднике «Интернациональный» АК «АЛРОСА» осуществляется с применением слоевой нисходящей системы разработки с твердеющей закладкой. Ведение очистных работ в нижней части бло-

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке института ЯКУТНИПРОАЛМАЗ АК «АЛРОСА».

ка № 4 при отработанных ранее блоках №6 и №5 планируется производить под защитой предохранительного целика, формируемого ниже подошвы (а.о.-97 м) высоконапорного Метегеро-Ичерского водоносного комплекса (МИВК). Граница безопасного ведения очистных работ, установленная расчетами НТЦ «НОВОТЭК» (г. Белгород), располагается на а.о.-150 м.

Очистные работы в блоке №4 начались с отработки разрезного слоя 9 высотой 4 м, после выемки которого формируется нижняя граница предохранительного рудного целика (а.о.-155 м) под МИВК (рис. 1). Общее количество слоев до кровли блока №5 составляет 9.



Рис. 1. Расчетная схема

При ведении очистных работ необходим обязательный контроль состояния предохранительного целика [1], осуществляемый на руднике в соответствие с проектом гидрогеомеханического мониторинга (ГГМ). Геомеханическая часть проекта ГГМ, предложенная ИГД СО РАН, предусматривает использование комплекса инструментальных методов наблюдений (профильных линий, глубинных реперов, инклинометрических наблюдений) за сдвижением вмещающих пород и рудного предохранительного целика, а также формируе-

мого закладочного массива, являющегося его основанием (упором). Методология комплексного подхода к организации и ведению геомеханического мониторинга рассмотрена в работах [2, 3].

Составной частью геомеханических наблюдений предусмотрен контроль конвергенции «кровля-почва» подготовительных выработок на станциях контурных реперов (СКР), установленных через определенный интервал по длине кольцевого дренажного штрека на отм.-145 м и закладочного орта на отм.-155 м. Контроль сдвижений вмещающих пород в окрестности рудного тела в процессе послойной отработки блока №4 планируется осуществлять по станциям скважинных глубинных реперов (СГР), оборудованных в этих же выработках.

С целью выбора методов и средств измерений при проведении геомеханического мониторинга выполнена прогнозная оценка смещений контуров выработок и вмещающих пород на станциях глубинных реперов в процессе послойной отработки блока №4. Расчеты ожидаемых смещений выполнены на основе решения плоской задачи теории упругости методом граничных интегральных уравнений с учетом влияния на НДС отработанного и заложенного нижележащего блока № 5 (см. рис.1). Параметры естественного поля напряжений нетронутого массива приняты следующие: $\sigma_z^0 = -\gamma H$, $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = -\lambda\gamma H$, где $\sigma_z^0 -$ вертикальная, σ_x^0 , $\sigma_y^0 -$ горизонтальные компоненты напряжений, $\gamma -$ объемный вес

пород, Н – глубина разработки, λ - коэффициент бокового распора; из-за доминирующего преобладания галита в составе вмещающих пород принято – λ =1.0. Модуль упругости пород Е = 10 ГПа, коэффициент Пуассона ν = 0.25. В нетронутом массиве на отметках нижней части блока №4 $\sigma_z^0 = \sigma_y^0 = \sigma_x^0 = 14$ МПа.

Предполагается, что к началу проведения геомеханических наблюдений будет отработан слой 9.

На рис. 2 приведены изменения вертикальных смещений контуров выработок в направлении «кровля-почва», вызванные отработкой в нисходящем порядке слоев $8 \rightarrow 6$, при различном удалении выработок (L,м) от контакта рудного тела (см. рис. 1). Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшие смещений отмечаются в закладочном орте на отм.-155 м, а их максимальная величина при расстоянии орта в 5 м от контура рудного тела составляет 2.8 мм.



Рис. 2. Смещения контуров выработок в направлении «кровля-почва» при различном их расстоянии от рудной трубки на отм.-155 м и -145 м

На рис. 3 и 4 приведены вертикальные смещения на СКР в закладочном орте на отм.-155 м в процессе последовательной отработки слоев 8→1 блока № 4.

Анализ результатов расчетов показывает следующее:

– вертикальные смещения в сторону растяжения наблюдаются при отработке слоев 8→5; при последующей выемке слоев 4→1 они становятся растягивающими (см. рис. 3);

– на завершающей стадии отработки блока №4 максимальные смещения на СКР составляют около 12 мм при расстоянии 10 м от контура трубки (см. рис. 4);

– расположение СКР в орте на удалении 40 м от контура трубки представляется нецелесообразным, т.к. ожидаемые величины смещений не превышают 2 – 3 мм, что сопоставимо с погрешностью их измерений методом нивелирования.



Рис. 3. Вертикальные смещения в закладочном орте на отм.-155 м на различных удалениях СКР от контура трубки в зависимости от числа отработанных слоев



Рис. 4. Вертикальные смещения на СКР в закладочном орте на отм. -155 м при отработке блока №4 до кровли блока № 5



Для прогноза сдвижений вмещающего массива, контролируемых с использованием станций глубинных реперов (СГР), проведены расчеты горизонтальных смещений в скважинах на отм.-145 м и -155 м (рис. 5).

Наибольшие горизонтальные смещения наблюдаются во вмещающем массиве на расстоянии ≈10 м (отм.-145 м) и ≈15 м (отм.-145 м) от контура рудного тела, достигая 12 мм и 10 мм соответственно. С удалением от контура

кой слоев 8→6 достигая 12 м ственно. С уд

рудного тела горизонтальные смещения пород уменьшаются (до 6 мм на расстоянии 45 м).

На рис. 6 приведены смещения вмещающих пород вдоль оси скважин для установки станций глубинных реперов, вызванные отработкой слоев 8→ 6 бло-

ка №4. Наибольшие смещения вдоль оси скважин под углом 45° и 25° к горизонту наблюдаются вблизи контура рудного тела (более 25 мм, см. рис. 6).

заключение B отметим, что полученная информация об ожидаемых смещениях в подготовительных выработках породах И вмещающих В отрабатываемого окрестности под МИВК блока №4 необходима для выбора методов и средств измерений, а также мест расположения наблюда-



Рис. 6. Смещения (мм) вмещающих пород (мм) вдоль скважин под углом 45° и 25° к горизонту, вызванные отработкой слоев 8→6

тельных станций геомеханичсекого мониторинга. Последующее сравнение данных натурных наблюдений с результатами прогнозных оценок деформационных процессов

в массиве в процессе развития горных работ позволит скорректировать параметры расчетной модели [4] и на её основе осуществлять текущую оценку геомеханического состояния предохранительного целика в период и после завершения очистных работ в блоке №4 для обеспечения безопасности горных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ при комбинированной (совмещенной) разработке рудных и нерудных полезных ископаемых. РД06-174-97. –М., ЗАО НТЦ ПБ. – 2011.

2. Барышников В.Д., Барышников Д.В., Гахова Л.Н., Качальский В.Г. Геомеханический мониторинг при разработке полезных ископаемых // ФТПРПИ. – 2014. – №5, С. 61 – 74.

3. Барышников В.Д., Барышников Д.В. Геомеханический контроль предохранительного целика под водоносным горизонтом / Proceedings of the V^{-th} International Geomechanics Conference 18-21 June 2012, – Publ.: International House of Scientists «Fr.J.Curie», Varna, Bulgaria, pp. 329 – 324.

4. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Развитие экспериментальноаналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. – 2012. – №4, С. 20 – 28.

© В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова, 2015

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Алексей Геннадьевич Вострецов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии производства радиотехнических систем, проректор, тел. (383)346-48-72, e-mail: vostretsov@adm.nstu.ru

Геннадий Иванович Кулаков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник тел. 8(383)217-06-07, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Галина Евгеньевна Яковицкая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник тел. 8(383)217-08-06, e-mail: yge@ngs.ru

Представлены результаты энергетических оценок при механо-электромагнитных преобразованиях в процессах разрушения образцов горных пород. Оценки можно использовать для диагностики степени удароопасности горных пород в условиях подземных горных предприятий.

Ключевые слова: склонность горных пород к хрупкому разрушению, коэффициент механо-электромагнитных преобразований, образцы горных пород.

LAB TEST DIAGNOSTICS OF ROCK FRACTURE BASED ON ELECTROMAGNETIC RADIATION ENERGY CHARACTERISTICS

Aleksey G. Vostretsov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Marks prospect, Dr Eng, Prof, Department of Construction and Technology of Radio Electronic Devices, Vice-Principal, tel. (383)346-48-72, e-mail: vostretsov@adm.nstu.ru

Gennady I. Kulakov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Prof, Principal Researcher, tel. (383)217-06-07, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Galina E. Yakovitskaya

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Principal Researcher, tel. (383)217-08-06, e-mail: yge@ngs.ru

The paper discusses energy estimation of fracture of rock specimens under mechanical– electromagnetic transformation. The energy estimates are applicable to diagnostics of rockburst hazard in underground mines.

Key words: rock liability to brittle failure, coefficient of mechanical-electromagnetic transformation, rock specimens.

Обеспечение безопасных условий отработки месторождений полезных ископаемых является приоритетным направлением исследований в горных науках (геомеханика, геотехнологии). Минувшие десятилетия отмечены во всем мире устойчивой тенденцией перехода ведения горных работ на большие глубины, что связано с возникновением динамических проявлений горного давления, в том числе, в катастрофической форме. Рост количества и интенсивности этих проявлений, отчетливо наблюдаемый с увеличением глубины разработки месторождений, требует целенаправленных исследований механизмов и особенностей протекания динамических событий в массивах горных пород, связанных с нарушением их равновесного состояния. Эта информация является неотъемлемой для выработки научно обоснованных критериев прогнозирования разрушений в горных массивах, вызванных изменением их напряженно-деформированного состояния при ведении горных работ. Одним из перспективных методов диагностики и контроля разрушения горных пород и массивов рассматривается метод, основанный на регистрации сигналов сопутствующего электромагнитного излучения (ЭМИ). Развитие его, как прогнозного метода, касающегося динамических проявлений горного давления в массивах, требует, прежде всего, разработки новых методов и измерительных средств: создания необходимой феноменологической и приборно-измерительной базы для лабораторных и натурных экспериментов, геомеханической интерпретации контролируемой информации. Возникающие и развивающиеся системы трещин являются источником ЭМИ-излучения. Поэтому изучению особенностей электромагнитного излучения трещиной или системами трещин, в том числе из очага разрушения, уделяется особое внимание.

Поскольку основной причиной изучаемого процесса ЭМИ является трещинообразование и рост его в массивах в процессе возрастания напряжений, то в качестве модели, описывающей процессы разрушения горных пород удобно выбрать ту, которая в явном виде содержит какие-либо параметры трещин. Такие параметры содержит модель, основанная на концентрационном критерии разрушения твердых тел С.Н. Журкова, которую мы принимаем как основную. Известно, что элементарный акт механо-электрического преобразования за период возбуждения тока можно представить в виде диполя электрического или магнитного типа; а в качестве модели генерации трещиной электромагнитного излучения используем источники, аппроксимируемые электрическим и магнитным диполями

Целью настоящей работы является оценка склонности горных пород к удароопасности (хрупкому разрушению) по энергетическим характеристикам электромагнитных сигналов ЭМИ, излучаемых при разрушении. Для этого необходимо решить следующие задачи: провести анализ литературных данных по оценке величины мощности сигналов ЭМИ в очаге разрушения для некоторых горных пород и определить энергетические характеристики применительно к конкретным образцам горных пород; провести лабораторные эксперименты на различных по структуре и составу образцах горных пород с синхронной регистрацией сигналов ЭМИ и механических характеристик на стадии нарушения их сплошности; определить величину поверхностной плотности сигналов ЭМИ для различных по структуре и свойствам горных пород, по величине которой возможно оценить склонность к удароопасности испытываемых образцов горных пород; разработать диаграмму, позволяющую визуализировать полученные результаты.

Методика экспериментов включала установку исследуемых образцов между плитами пресса "Instron-1" (Институт проблем механики ИПМ РАН, Москва) и одноосное их нагружение до разрушения. При этом осуществлялась регистрация нагрузки, сигналов ЭМИ и токовых импульсов. Датчик нагрузки был установлен на прессе. Привязка каналов по времени осуществлялась кварцевым синхрометром г 7-15 с точностью не хуже 100 мкс. Для регистрации сигналов ЭМИ использовалась магнитная антенна с ферритовым сердечником, установленная на расстоянии 0.2 м от образца. В качестве токовой антенны использовался «пояс Роговского», представляющий собой два тороидальных диэлектрических каркаса (из пенопласта), расположенных перпендикулярно друг другу с наружными диаметрами соответственно 0.3 и 0. 26 м с намотанными на них витками медного провода.

- Магнитный регистратор – шестиканальный магнитофон фирмы Брюль и Къер, диапазон частот 70 Гц -20 кГц.

Результаты лабораторных экспериментов

Измерения электромагнитных сигналов проводились в диапазоне 70 Гц – 20 кГц.

Сигналы с датчиков через усилители подавались на магнитный регистратор, затем на компьютер. Сигналы ЭМИ регистрировались по каналу 2, а токовые – по каналам 3 и 4. В экспериментах использовались следующие образцы горных пород: гранит, известняк, мрамор, песчаник, кварцевый сиенит, туф, мраморизованный известняк, эпидот-гранатовый скарн, сиениты, магнетитовые руды с различным содержанием руды и др. Всего было исследовано свыше 70 образцов, которые изготавливались прямоугольной и цилиндрической формы высотой от 0.06 - 0.17 м и поперечным размером 0.03-0.06 м.

Были зарегистрированы несколько типов разрушения

- многоступенчатое – мраморизованного известняка;

- плавное – мелкоигольчатого мелкоблочного туфа;

- резкое одноступенчатое – кварцевого сиенита.

На основании результатов экспериментов были зарегистрированы следующие данные: токи в образцах, длительности импульсов ЭМИ, максимальная нагрузка.

Далее приведены математические выражения, которые позволили по данным экспериментов с использованием этих выражений произвести расчеты мощностных и энергетических электромагнитных характеристик исследуемых образцов.

Опираясь на известное положение о том, что возникновение трещины в твердом теле сопровождается возникновением одиночного импульса сигналаЭМИ, длительность которого соответствует времени ее развития, и что начальный размер возникающей трещины может быть равен 10^{-4} м, критическое для объема V количество трещин *n* можно найти из соотношения:

$$n = \frac{V}{l_i^3 K^3} , \qquad (1)$$

где *К* – концентрационный критерий, принимающий для горных пород согласно Журкову С.Н., Куксенко В.С., Петрову В.А. значения 2,7-5.

Здесь же приведены другие математические выражения, позволяющие определить величину поверхностной плотности энергии сигналов ЭМИ, т.е. величину удельной энергии, распределенной на вновь образованных поверхностях возникающих трещин.

Для оценки мощности W, излучаемой источником ЭМИ (трещинами) за период возбуждения тока, использовалось выражение, приведенное в [8]:

$$W_{\Sigma} = \frac{1}{2\varepsilon_0} \frac{(2\pi)^3 \omega^4 P^2}{3C^2}, \text{ BT,}$$
(2)

где Р – общий для источника дипольный момент, (Кл. м.); ε_0 –диэлектрическая проницаемость в вакууме – $1/36\pi \cdot 10^{-9} \, \Phi/\text{M}$; ε – относительная диэлектрическая проницаемость равная 4 отн. ед.; С – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8 \text{ м/c}$); ω – регистрируемая частота излучения электромагнитного сигнала, Гц.

Для одиночной трещины излучаемая энергия Э₁ может быть оценена по формуле:

$$\mathcal{P}_1 = W_1 \cdot \tau \,, \, \boldsymbol{\Xi}_{\mathcal{H}}, \tag{3}$$

где W₁ – мощность электромагнитного поля, излучаемая единичной трещиной. Ее дипольный момент оценивается по формуле [9]:

$$\mathbf{P}_1 = \mathfrak{I}_1 \tau_1 \ell_0, \, \mathrm{K\pi} \, \mathrm{M}, \tag{4}$$

где ℓ_0 – начальный размер (размер начальной) возникающей трещины в образце; τ_1 –длительность и \mathfrak{T}_1 – амплитуда токового импульса, соответственно.

В эксперименте для испытываемых образцов горных пород были зарегистрированы амплитудные значения для токов от 4,0^{-10⁻⁵} до 5,1^{-10⁻³} А с длительностями от 0,5^{-10⁻³} до 5,3^{-10⁻³} с, соответственно.

Затем приведены данные по оценке величин поверхностной плотности энергии сигналов ЭМИ для различных горных пород, откуда следует, что наибольших значений они достигают у кварцитов и сиенитов, а наименьших – у мраморов и туфов.

В Таблице исследуемые образцы ранжируются по склонности к удароопасности по предлагаемому параметру - поверхностной плотности энергии сигналов электромагнитного излучения. Так, по классификации ВНИМИ, образцы мраморизованного известняка, и мелкоблочного мелкоигольчатого туфа относятся к слабо склонным к удароопасности, склонными к удароопасности – массивные мелкозернистые сиениты. Весьма склонными к удароопасности являются: кварцевый сиенит с прожилками карбоната, мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната, магнетитовая руда с 60% содержанием железа, мелкозернистый кварцит.

Таблица

	Тип горной породы,	Литерат.	Оценка	Э,,
N⁰	месторождение	источник	склонности	Дж/м 2
1	Кварцевый диорит (К)	1	весьма склонен	7 10 ⁻¹¹
2	Кварцит (3)	2	весьма склонен	$2 10^{-11}$
3	Кварцевый сиенит (Т)	2	весьма склонен	7.3 10 ⁻¹²
4	Сиенит (Т)	1	весьма склонен	4 10 ⁻¹²
5	Сиенит (Т)	2	весьма склонен	$1.1 \ 10^{-12}$
6	Магнетитовая руда 60% (Т)	2	склонен	$2.7 \ 10^{-13}$
7	Туф (3)	2	склонен	$1.4 \ 10^{-13}$
8	Мраморизованный известняк (Т)	2	слабо склонен	$1.7 \ 10^{-14}$
9	Мраморизованный известняк (К)	2	не склонен	$2.3 \ 10^{-15}$
10	LiF	3		1 10 ⁻¹⁶
11	KaCℓ	3		$1.6 \ 10^{-17}$
12	NaCℓ	3		$1.16 \ 10^{-17}$

Определение склонности горных пород к разрушению по уровню поверхностной плотности энергии сигналов ЭМИ

На рис. 1, 2 представлены диаграммы, позволяющие визуализировать полученные результаты. Здесь на рис. 1 по оси ординат расположены типы пород, а по оси абсцисс – соответствующие им величины поверхностной плотности энергии сигналов ЭМИ. Итак, наиболее удароопасными являются различные типы сиенитов, кварциты и магнетитовая руда, а наименее – мраморизованного известняка и туфов. Рис. 2 иллюстрирует изменение безразмерного коэффициента механоэлектрических преобразований.

Таким образом в результате проведенных экспериментальных исследований на образцах горных пород получены следующие результаты :

 произведены численные оценки мощности излучения сигналов ЭМИ на стадии нарушения сплошности образцов горных пород;

 предложен критерий оценки склонности образцов горных пород к разрушению по величине поверхностной плотности энергии сигналов ЭМИ;

 предложена диаграмма оценки удароопасности горных пород, позволяющая визуализировать результаты расчетных и экспериментальных данных.



Рис.1. Оценка склонности горных пород к хрупкому разрушению по величине поверхностной плотности энергии электромагнитного излучения (пояснения в тексте)



Рис. 2. Определение (расчет) безразмерного энергетического коэффициента механоэлектрических преобразований $K = W_9 / W_0$, Дж^{1/2}

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев А.А., Завадовская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводимости и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них. // ДАН. – 1975. – Т. 220. – № 1.

2. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений. / Под ред. М.Б. Гохберга. – М.: ИФЗ АН СССР. – 1988.

3. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. Волны маятникового типа. Ч. III: Данные натурных измерений. // ФТПРПИ. – 1996. – № 5.

4. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Параллель. – 2008, 314 с.

5. Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии в объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах. // ДАН. – 1985. – Т. 283, № 5.

6. Хатиашвили Н.Г., Перельман М.Е. Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявления при землетрясениях. // Д АН– 1983. – Т. 211. – № 1.

7. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988.

8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.Д. Электродинамика сплошных сред. – М.: Изд-во ТЭЛ. – 1957.

9. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука – 1975.

10. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А. О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // ФТПРПИ. – 1988. – № 1.

© А. Г. Вострецов, Г. И. Кулаков, Г. Е. Яковицкая, 2015

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБВАЛООПАСНЫХ УЧАСТКОВ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ В РЕЖИМЕ ON-LINE

Владимир Иванович Востриков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лаборатории горной геофизики, тел. (383)217-00-01, e-mail: vvi.49@mail.ru

Никита Сергеевич Полотнянко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер лаборатории горной геофизики, тел. (383)217-00-01, e-mail: pbox@inbox.ru

Разработан и изготовлен опытный вариант многоканального измерительного комплекса «Карьер-М» для регистрация геомеханического состояния обвалоопасных участков массива горных пород. Осуществлена интеграция в глобальную сеть Интернет, что позволило работать с комплексом в режиме удаленного доступа, получать информацию в режиме on-line в Институте горного дела. В настоящее время комплекс развернут и запущен в опытную эксплуатацию в режиме долговременного мониторинга на самом глубоком в России алмазаносном карьере «Удачный» (республика Саха).

Ключевые слова: измерительная система, геомеханическое состояние, удаленный доступ, карьер.

MULTICHANNEL MEASURING EQUIPMENT FOR MONITORING ROCKFALL-HAZARDOUS AREAS IN OPEN PIT MINES WITH ON-LINE DATA ACQUISITION

Vladimir I. Vostrikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Head of Rock Geophysics Laboratory, tel. (383)217-00-01, e-mail: vvi.49@mail.ru

Nikita S. Polotnyanko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Engineer, Rock Geophysics Laboratory, tel. (383)217-00-01, e-mail: pbox@inbox.ru

The prototype multichannel measuring equipment Karier-M has been designed for geomechanical monitoring of rockfall-hazardous areas in rock masses. Integration of the equipment into Internet enables remote operation of the equipment and on-line data acquisition at the Institute of Mining. Currently the equipment is being under trial operation in the mode of long-term monitoring in Russia's deepest diamond open pit mine Udachny in Republic of Sakha.

Key words: measuring system, geomechanical conditions, remote access, open pit mine.

Современный этап добычи полезных ископаемых открытым способом характеризуется значительным увеличением глубин их извлечения, которые могут достигать нескольких сотен метров. Дальнейшее углубление карьеров приводит к постановке вопроса: либо выполаживать углы откоса бортов, либо их увеличивать. Принятие первого положения приводит к увеличению объема вскрышных работ и, как следствие, к значительному увеличению финансовых и трудовых затрат. Увеличение угла наклона бортов позволяет радикально минимизировать затраты на разработку глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых открытым способом. При таком подходе ведения горных работ возникает необходимость организации инструментальных наблюдений за деформациями бортов, уступов карьеров.

Карьер "Навахаб" (республика Намибия) по добыче золота ведет разработку крутопадающего (под углом 70°) рудного тела. Достигнутая глубина горных работ – 200 метров. В 1998 на восточном борту карьера произошло обрушение пород высотой 15 м. В 1999 году здесь же высота обрушенных пород составила 30 м, а в 2001 году – 50 м [1].

Произошедшие аварийные обрушения инициировали организацию системы комплексного мониторинга устойчивости бортов карьера. Для этого был разработан комплекс мониторинга, включающий три основные компоненты. Это маркшейдерские наблюдения за сдвижением горных пород посредством системы отражающих призм, установленных на различных отметках по периметру карьера. Второй компонент – сейсмологическая сеть из восьми трехкомпонентных датчиков, четыре из которых размещены вблизи поверхности, а четыре в глубоких (150-200 м) специально пробуренных скважинах. Установленные датчики обеспечивают регистрацию сейсмособытий с энергией в первые Джоули. Получаемая информация по цифровым радиоканалам и Интернету в режиме реального времени передается в район Кейптауна, в головной офис ISSI, где производится ее обработка и интерпретация.

Третий компонент – с помощью сенсорных датчиков индуктивности осуществляется непосредственный контроль деформационных процессов в бортах карьера. Запись информации производится непрерывно. При достижении деформациями некоторого критического значения включается звуковая сигнализация и в карьер подается ароматический газ. Это является оповещением по задействованию плана ликвидации аварий. Таким образом, за счет применения современных систем инструментального контроля обеспечивается высокая эффективность и безопасность горных работ на карьере.

В [2] рассмотрена автоматизированная измерительная система оценки устойчивости бортов карьера, основанная на различных методах регистрации явлений, предшествующих крупномасштабному разрушению: электрофизический, индукционный, электромагнитный, оптический, акустический, пьезоэлектрический. Передача информации осуществляется по сотовым каналам связи. Но эта система не существует в натурном виде, не испытывалась на реальных горных предприятиях и, соответственно, говорить о ее реальном применении не имеет смысла.

В измерительном комплексе "Сдвиг-4МР" [3] применяются датчики непосредственно измеряющие смещения геоблоков. Анализ применения этого измерительного комплекса показал его существенные недостатки с точки зрения эксплуатации. Отсутствие дистанционной передачи данных не позволяет оперативно обрабатывать информацию и обеспечить принятие экстренных мер при чрезвычайных ситуациях. Значительное потребление энергии от аккумуляторов уменьшает время работы в автономном режиме. Значительный вес станции, кабельное соединение датчиков со станцией, крепление датчиков цементными составами на поверхности трещины, отсутствие защиты от атмосферных воздействий (влаги) приводят к снижению мобильности, создает определенным трудностям при перестановке комплекса на другие места регистрации, ставит под сомнение качество измерений.

Более совершенная система [4, 5] обладает дистанционной передачей данных, существенно снижены массогабаритные характеристики и энергопотребление. Применение разжимных датчиков, устанавливаемых непосредственно в трещину, повышает достоверность регистрации и значительно упрощает развертывание системы для производства измерений.

Измерения на горных предприятиях (карьерах, подземных рудниках), а тем более долговременный мониторинг каких-либо геодинамических процессов требует применения специфической измерительной аппаратуры, отвечающей условиям эксплуатации в натурных условиях. К таким эксплуатационным характеристикам относятся:

- мобильность аппаратуры, весогабаритные параметры, автономность по энергопитанию;

- простота развертывания комплекса для производства мониторинга, простота установки измерительных датчиков без применения укрепляющих составов в виде клеев и цемента;

- дистанционный съем информации;

- минимальные трудозатраты на обслуживание.

Если аппаратура не соответствует этим требованиям, то ее применение вызывает большие проблемы по эксплуатации, практически, такая аппаратура не жизнеспособна.

Опытная эксплуатация измерительных комплексов "Карьер" [3, 4], для регистрации подвижек геоблоков в бортовых откосах глубоких карьеров выявила их недостатки, что позволило выработать требования для модернизации комплексов. Разработанный комплекс "Карьер-М", функциональная схема которого представлена на рис. 1, – это по существу новая разработка, созданная для работы на руднике "Удачный".

При разработке комплекса "Карьер-М" был учтен опыт эксплуатации выше описанных систем. Разработан датчик с передачей измерительной информации по радиоканалу непосредственно на базовый ретранслятор, развернутый на краю карьера, что позволило отказаться от блоков сбора информации и кабельных соединений. Существенное уменьшение энергопотребления датчиков позволило исключить применение карьерных трансформаторных подстанций (КТП). Значительно уменьшен вес датчика и расширен диапазон регистрации, что повысило мобильность комплекса и упростило его развертывание для производства измерений.



Рис. 1. Функциональная схема комплекса "Карьер-М"

Создан канал передачи информации от Центра сбора информации в локальную сеть Управления комбината на компьютеры в маркшейдерском отделе и отделе деформационных измерений. Интеграция комплекса в глобальную сеть Internet позволяет управлять комплексом и снимать измерительную информацию с сервера, установленного в Институте горного дела.

Модернизация комплекса "Карьер" привела по существу к разработке нового измерительного комплекса, получившего название "Карьер-М". Новый комплекс обладает значительно лучшими эксплуатационными характеристиками. Выполнена интеграция в локальную сеть ГОКа и в глобальную сеть Интернет, таким образом, осуществлена возможность работать с комплексом в режиме удаленного доступа, получать информацию в режиме on-line в Институте горного дела, а также удаленно управлять работой комплекса. Претерпели значительное усовершенствование электронные узлы датчиков. Передача информации с них передается непосредственно на базовый ретранслятор, установленный на краю карьера, т.е. удалось исключить дополнительные блоки сбора и передачи информации, которые устанавливались возле датчиков. Значительно минимизировано электропотребление датчиков, что позволило осуществлять их питание от малогабаритных источников и, таким образом, отказаться от применения карьерных трансформаторных подстанций. Без замены источников питания датчики могут работать в течение одного года. Применение специализированных электронных компонентов расширило температурный диапазон работы комплекса в сторону низких значений до значений - 40°C.

Эти и ряд других усовершенствований, в том числе и программного обеспечения, позволило повысить мобильность комплекса, уменьшить весогабаритные характеристики, упростить развертывание комплекса для производства измерений, значительно уменьшить трудозатраты на обслуживание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А. Южноафриканское техническое сафари. // «Горное эхо» – 2006. – № 6.

2. Демьянов В.В. Автоматизированная телекоммуникационная система контроля устойчивости бортов карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень . – 2009. – № 12, С. 93-95.

3. Димаки А. В., Псахье С. Г. Распределенная измерительная система для мониторинга смещений по границам раздела блочных сред на базе комплекса "Сдвиг 4МР". // ФТПРПИ – 2009. – № 2.

4. Востриков В.И., Ружич В.В., Федеряев О.В. Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // ФТПРПИ. – 2009. – № 6.

5. Vostrikov V.I., Oparin V.N. Multichannel Instrumentation System for Strain and Displacement Measurements // Proceeding of the 2009 International Symposium on Mechatronic and Biomedical Engineering and Applications. Taiwan, N_{2} 5, 2009.

© В. И. Востриков, Н. С. Полотнянко, 2015

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОЛЕЙ МАКРО- И МИКРОДЕФОРМАЦИЙ, ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ГЕОСРЕДЫ ДО РАЗРУШЕНИЯ. КОМПЛЕКС ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ^{*}

Владимир Иванович Востриков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией горной геофизики, тел. (383)217-00-01, e-mail: vvi49@mail.ru

Ольга Михайловна Усольцева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, руководитель ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Павел Александрович Цой

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

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

Создан стенд для синхронной регистрации физических полей: макро- и микродеформаций, теплового, акустической эмиссии генерируемых при нагружении физических моделей, имитирующих геосреду, до разрушения. Отработана методика проведения эксперимента по нарушению сплошностигеосреды методом флюидоразрыва. Проведен тестовый эксперимент.

Ключевые слова: измерительный стенд, модель геосреды, лабораторный эксперимент, флюидоразрыв, структура, спекл-метод, акустическая эмиссия.

INTERACTION OF MACRO- AND MICRODEFORMATION FIELDS, INFRARED RADIATION AND MICROSEISMIC EMISSION IN GEOMEDIUM UNDER LOADING UNTIL FAILURE. PHYSICAL MODELING EQUIPMENT

Vladimir I. Vostrikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Head of Rock Geophysics Laboratory, tel. (383)217-00-01, e-mail: vvi49@mail.ru

Olga M. Usoltseva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Phys-Math, Executive Director of Shared Use Center for Ge-

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 15-05-07566) на оборудовании ЦКП ГГГИ СО РАН.

omechanical, Geophysical and Geodynamic Measurements SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx prospect, Ph. D. Phys-Math, Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

The authors have designed a bench for measuring synchronously micro- and macrodeformations, thermal field and acoustic emission in physical models simulating geomedium under loading until failure. The experimental procedure is worked out.

Key words: measuringbench, geomedium model, laboratory experiment, fluid fracturing, structure, speckle-method, acoustic emission.

Тектоническая активность, разрушение горных пород вызывают проявление различных физическихявлений, таких как поле деформаций, температурные изменения, акустическую и микросейсмическую эмиссии. Имеется достаточно большое количество работ, посвященных изучению данных явлений.

В [1-6] исследуются сигналы акустической эмиссии, возникающие при деформировании образцов горных пород, анализируются распределения сигналов по энергии, динамике изменения их спектров, с целью изучения взаимосвязи с процессом развития микродефектов, их локализации и образования магистральной трещины.

В [7-11], проведено детальное исследование эволюции полей микроперемещений и микродеформаций при различных видах нагружения образцов горных пород: одноосное, двухосное сжатие, бразильская проба, испытания на ползучесть. Показано, что при уровне нагрузки около 0,5 от предела прочности появляются зоны локализации микродеформаций, существенно превышающие средние значения по поверхности образца, которые в дальнейшем формируют зоны разрушения.

Подавляющее большинство исследований ориентировано на изучение отдельных видов полей без увязки с другими, что ведет к неоднозначной оценке действия нарушения сплошности на геомеханическое состояние среды. В связи с этим проблема адекватного описания геофизических процессов, происходящих в геоматериалах при нарушении его сплошности, определение закономерностей проявления физических полей и корреляционных зависимостей между ними является весьма актуальной.

Для исследования взаимосвязи между параметрами физических полей различной природы (деформационным, микродеформационным, инфракрасным полем и сигналами микросейсмической эмиссии), генерируемыми при нарушении сплошности геологической среды от воздействия различных видов нагружения был создан многопараметрический комплекс. На рис. 1 приводится функциональная схема комплекса, который включает в себя сервогидравлический пресс, систему управления флюидоразрывом, комплект измерительного оборудования: микродеформаций, микросейсмической эмиссии, инфракрасного излучения, скоростную видеокамеру. Особое внимание было уделено синхронизации функционирования измерительного оборудования.



Рис. 1. Функциональная схема многопараметрического комплекса для регистрации физических полей различной природы: макро- и микродеформаций, теплового, микросейсмической эмиссии

На рис. 2. показан общий вид многопараметрического измерительного комплекса. Для создания нагружений различного вида использовался сервогидравлический пресс фирмы Instron, позволяющий реализовывать программы нагружения с заданной скоростью по усилиям и по перемещениям, вести непрерывную запись нагрузок и перемещений. Для регистрации микродеформаций спекл-методом применялась автоматизированная система анализа цифровых спекл-фотографий ALMEC-tv, которая позволяет проводить измерение поля микроперемещений с точностью 1 мкм с частотой до 27 кадров в секунду. Для проведения экспериментов по нарушению сплошности геоматериала с помощью флюидоразрыва разработана специальная система, позволяющая непрерывно с постоянной скоростью подавать флюид в полость физической модели для ее разрыва. Устройство позволяет менять скорость подачи флюида. Пресс доукомплектован специально сконструированным блоком, позволяющим проводить испытания модели геосредыв режиме двухосного сжатия. Дополнительный блок создает сжимающее усилие, перпендикулярное усилию, задаваемому прессом (рис. 3). В захватах пресса (1) фиксировалось специальное устройство (2), которое представляло собой раму (3), состоящую из двух частей, в которую устанавливается испытываемая модель (4). Нормальное (прижимающее) усилие создавалось гидравлическим цилиндром (5), усилие контролируется манометром и электронным датчиком давления. Нормальное перемещение фиксировалось с помощью 4-х датчиков SolartronDP10S (6), расположенных в плоскости, перпендикулярной нормальному усилию. В процессе испытания непрерывно фиксировались и записывались в компьютерный файл усилие, задаваемое прессом, перемещение траверсы, горизонтальное усилие и соответствующее ему перемещение.



Рис. 2. Общий вид многопараметрического комплекса для регистрации физических полей различной природы: макро-имикродеформаций, теплового, акустической эмиссии, видеосъемки



Рис. 3. Устройство для испытаний модели геосреды в режиме двухосного сжатия: захваты пресса (1), устройство размещения модели геосреды (2), рама (3), модельный образец (4), гидравлический цилиндр (5), 4-е датчика для измерения горизонтального перемещения (6)

При проведении эксперимента непрерывно измерялись поля микроперемещений на поверхности куба спекл-методом. Акустические сигналы измерялись с помощью акселерометров KD 91 многоканальной системой "Pulse". Одновременно производилась видеосъемка. Для регистрации температурного поля использовался компьютерный тепловизорТКВр–ИФП "СВИТ.

Заключение. Создан комплекс для синхронной регистрации физических полей: макро- и микродеформаций, теплового, акустической эмиссии генерируемых при нагружении физических моделей, имитирующих геосреду, до разрушения. Отработана методика испытаний. Проведены тестовые эксперименты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. Соболев Г.А., Лементуева Р.А., Лось В.Ф. Изучение спектров акустических сигналов / IX Межд. Школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Тез. Доклада, Иркутск. – 2013, С. 84.

2. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Особенности локализации деформаций при одноосном нагружении горных пород. / IX Межд. Школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Тез. Доклада, Иркутск. – 2013, С. 64.

3. Винников В.А., Вознесенский А.С., Устинов К.Б., Шкуратник В.Л. Теоретические модели акустической эмиссии в горных породах при различных режимах их нагревания // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т.51. – № 1, С 172–177.

4. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Ошкин Р.О. Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении // ФТПРПИ. – 2014. – № 2, С. 69–76.

5. Щербаков И.П., Куксенко В.С. Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита // ФТПРПИ. – 2012. – № 4, С. 410–413.

6. Zhaoa X.G., M. Caib, J. Wanga,L.K. Maa. Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 64, pp. 258–269.

7. Shao–Peng Ma, Xiang–Hong Xu, Yong–Hong Zhao. Thegeo–DSCM system and its application to the deformation measurement of rock materials // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004. Vol. 41, pp.1–6.

8. Yunliang Tan, Yanchun Yin, and Tongbin Zhao. Investigation of Rock Failure Pattern in Creep by Digital Speckle Correlation Method // Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2013 (2013). Article ID 916069. http://dx.doi.org/10.1155/2013/916069.

9. ЗуевЛ.Б., БаранниковаС.А., Надежкин М.В., Горбатенко В.В. Локализация деформации и возможность прогнозирования разрушения горных пород // ФТПРПИ. – 2014 – № 1, С. 49–56.

10. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А. О некоторых особенностях эволюции напряженно–деформированного состояния образцов горных пород со структурой при одноосном нагружении // ФТПРПИ. – 2013. – № 5, С. 3–19.

11. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А. Эволюция напряженнодеформированного состояния образцов из искусственных геоматериалов при их однои двухосном нагружении // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2014. – № 3(20), С. 66-80.

© В. И. Востриков, О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, 2015

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОСЛОЙНОГО СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ВОДОВОДА В СТРОИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Лидия Николаевна Гахова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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 эффективности формирования напряженного состояния конструктивных элементов водовода, вызванного технологическими факторами, в том числе температурным воздействием, что позволяет влиять на выбор конструктивных параметров водовода и технологического режима бетонирования.

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

STRESSES IN STRUCTURAL ELEMENTS OF MULTILAYER STEEL-AND-CONCRETE WATER PASSAGEWAY DURING CONSTRUCTION

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

Using numerical modeling results, the author estimates stresses in structural elements of water passageway under induced external effect, including temperature, which is applicable in selecting design parameters of water passageways and operating of concreting.

Key words: Steel-and-concrete water passageway, numerical modeling, quasistatic thermoelasticity, stress state.

Натурные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов крупномасштабных железобетонных сооружений свидетельствуют о том, что в строительный период в железобетонных конструкциях возникают напряжения, вызванные технологическими факторами, в том числе температурным воздействием. Формирующиеся при этом остаточные напряжения могут оказывать существенное влияние на напряженное состояние конструктивных элементов в эксплуатационный период.

Крупномасштабными железобетонными сооружениями являются гидротехнические сооружения, к наиболее ответственным зонам которых относятся проложенные в большинстве случаев на низовой грани бетонных плотин турбинные водоводы, железобетонные оболочки которых подвержены в строительный и эксплуатационный периоды интенсивному трещинообразованию.

Одним из наиболее эффективных путей повышения трещиностойкости, прочности и долговечности массивных железобетонных конструкций, к каким

относятся турбинные водоводы, является предварительное напряжение конструкций. В массивных гидротехнических конструкциях обжатие бетона достигается путем целенаправленного регулирования температуры и влажности бетона [1, 2]. При возведении высоконапорных плотин для предотвращения трецинообразования в железобетонных облицовках турбинных водоводов проводятся конструктивные и технологические мероприятия по воздействию на термонапряженное состояние бетона, включающие применение цементов с умеренным тепловыделением, регулирование температуры бетонной смеси, применение опалубки с теплозащитными свойствами, определенный порядок распалубливания боковых граней блоков в холодный период и теплозащиту горизонтальных граней блоков в зимнее время года.

Ниже приведены результаты оценки остаточных напряжений в оболочке и арматуре водоводов, подверженных естественным (температура воздуха) и технологическими (экзотермический разогрев бетона) температурным воздействиям. Исследовалось термонапряженное состояние сталежелезобетонного водовода при его бетонировании в летний и зимний периоды с применением опалубки, имеющей различные теплозащитные свойства. Расчеты выполнены методом граничных интегральных уравнений (МГИУ) для кусочно-однородных областей [2 - 5].

Исследовалось НДС конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода Саяно-Шушенской ГЭС, представляющее собой многослойное кольцо,



Рис. 1. Расчетная схема: 1 – металлическая оболочка; 2, 4,6 – бетон; 3,5 – арматурное кольцо



Рис. 2. Сезонное колебание температура воздуха

состоящее из стальной оболочки и железобетонной обделки с двумя слоями кольцевой арматуры (рис. 1). Толщина арматурного кольца принята равной диаметру арматуры. Предполагалось, что металл оболочки, бетон и арматурные кольца – линейно деформируемые материалы. В табл. 1 приведены исходные данные для расчета напряженного состояния сталежелезобетонного турбинного водовода. Результаты расчетов представлялись в точках $A_1 - A_6$.

Предполагалось, что температура внутри водовода и наружного воздуха одинакова и принимается в соответствии с рис. 2: летний период – с 15 мая (среднесуточная температура > 5°С); зимний – с 15 ноября (среднесуточная температура < -5°С). Температура бетонной смеси 20°С. В расчетах варьировались коэффициенты теплопередачи опалубки (β_1 = 0.87; β_2 = 3.51 Вт/(м²·град.С) и тем-
пературы экзотермического разогрева бетона ($t_1 = 35^{\circ}$ C; $t_1 = 50^{\circ}$ C) [1,2]. На рис. За – распределение температуры в радиальном направлении и динамика температурного поля в зимнее и летнее время без разогрева и после экзотермического разогрева бетона (до 35°C), приводящего к увеличению температуры внутреннего слоя бетона в летний период бетонирования на 12–14°C и наружного на 9–11°C; в зимний период на 16–17°C и 8–10°C соответственно.

В данном варианте расчетов коэффициент теплопередачи опалубки $\beta_1 = 0.87 \text{ Bt/(m}^2 \cdot \text{град.})$. Бетонирование в опалубке с более высоким коэффициентом теплопередачи ($\beta_2 = 3.51 \text{ Bt/(m}^2 \cdot \text{град.})$) приводит к более интенсивному остыванию наружного слоя бетоны даже в летний период (рис. 36).

Таблица 1

Физические параметры массива	Стальная	Бетон	Материал
	оболочка		арматурных
			колец
Модуль упругости, Е, 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 и	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 æ, м ² /сек	$7.32 \cdot 10^{-6}$	$0.54 \cdot 10^{-6}$	$0.84 \cdot 10^{-6}$
теплоотдачи α ₁ , Вт/(м ² ·град)	3.51	0.87	2.1

Физико-механические свойства конструктивных элементов сталежелезобетонных водоводов

При остывании конструкции напряженное состояние характеризуется появлением значительных сжимающих напряжений в металлической оболочке (до -32,3 МПа при бетонировании в летний период и до -26,3 МПа при бетонировании в зимний, табл. 2). Во внутреннем арматурном кольце сжимающие напряжения достигают -10,2 МПа и -6,1 МПа соответственно; во внешнем арматурном кольце появляются растягивающие напряжения (6,5 МПа и 8,1 МПа).

Бетонирование в менее теплой опалубке снижает сжимающие напряжения в металлической оболочке на $\approx 11\%$ в летний и на $\approx 13\%$ в зимний периоды. В то же время, растягивающие напряжения во внешнем арматурном кольце возрастают на $\approx 40\%$ в летний и более чем на $\approx 45\%$ в зимний периоды (табл. 2).

При экзотермическом разогреве бетона до 50°С наибольшие остаточные сжимающие напряжения в металлической оболочке формируются при использовании теплой опалубки и в летнее время достигают -46,3 МПа. Растягивающие напряжения во внешнем арматурном кольце в полтора раза меньше, чем в аналогичных условиях при экзотермическом разогреве до 35°С (табл. 3). Наибольшие растягивающие напряжения во внешнем арматурном кольце формируются при бетонировании в зимнее время в «холодной» опалубке (табл. 2).

Приведенные результаты свидетельствуют о более эффективном технологическом формировании напряженного состояния конструктивных элементов водовода в летний период (технологическом обжатии). Замедленное остывание конструкции летом по сравнению с зимним периодом способствует увеличению формируемого обжатия металлической оболочки и снижению растягивающих напряжений во внешнем арматурном кольце. Следствием технологического обжатия является снижение суммарных растягивающих напряжения металлической оболочки и внутреннего арматурного кольца при нагружении водовода гидростатическим давлением.





а - без разогрева бетона и после экзотермического разогрева бетона;

б - в летний период года после экзотермического разогрева бетона

для двух вариантов коэффициента теплопередачи опалубки

Таблица 2

Тангенциальные напряжения (σ_θ, МПа) конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода после остывания конструкции. Экзотермический разогрев бетона до 35°C

		$\sigma_{\theta}, M\Pi a$			
Номер		Бетонирование в	в летний период	Бетонирование	
кольца	Конструктивный			в зимний период	
	элемент	$\beta_1 = 0.87$	β ₂ =3.51	$\beta_1 = 0.87$	β ₂ =3.51
		Вт/(м ² ·град.)	Вт/(м ² ·град.)	Вт/(м ² ·град.)	Вт/(м ² ·град)
1	Металлическая обо-	-32.3	-28.7	-26.3	-22.9
	лочка				
3	Внутреннее арм.	-10.2*	-6.4*	-6.1*	-3.9*
5	кольцо				
	Внешнее арм.	6.5*	9.1*	8.1*	11.7*
	кольцо				

* Напряжения приведены непосредственно в арматуре

Таблица 3

Тангенциальные напряжения (σ_θ, МПа) конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода после остывания конструкции. Экзотермический разогрев бетона до 50°C

		σ _θ , ΜΠα			
Ho-	Конструктивный	Бетонирование в летний пе-		Бетонирование в зимний пери-	
мер	элемент	риод		ОД	
коль-		$\beta_1 = 0.87$	$\beta_1 = 3.51$	$\beta_1 = 0.87$	β ₁ =3.51
ца		Вт/(м ² ·град.)	Вт/(м ² ·град.)	Вт/(м ² ·град.)	Вт/(м ² ·град.)
1	Металлическая	-46.3	-42.4	-29.1	-25.2
	оболочка				
3	Внутреннее арм.	-18.2*	-13.5*	-12.1*	-7.4*
5	кольцо				
	Внешнее арм.	4.2*	5.4*	5.7*	7.8*
	кольцо				

* Напряжения приведены непосредственно в арматуре

Данного подхода может быть использован для анализа температурных напряжений в окрестности подземных сооружений как в период строительства, так и в период их эксплуатации. Оценка эффективности предварительного обжатия дает возможность влиять на выбор конструктивных параметров водовода (уменьшение толщины металлической оболочки и арматурных стержней) и технологический режим бетонирования (температура экзотермического разогрева).

БИБЛИОГРАФИЧСКИЙ СПИСОК

1. Гаркун Л. М., Епифанов А.П., Идельсон В.Б., и др. Методы воздействия на напряженное состояние бетонных массивов гидротехнических сооружений. – М.: Энергоатомиздат. – 1987.

2. Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Напряженное состояние турбинных водоводов в строительный период. // Известия ВУЗов. Строительство. – Новосибирск. – 2012. – №9, С. 49 – 54.

3. Гахова Л.Н. Температурные напряжения в кусочно-однородном массиве. / Труды IX международной научной конференции «ГЕО-Сибирь-2013», т. 2. – Новосибирск: СГГА. – 2013.

4. Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Расчет напряжений в сталежелезобетонных турбинных водоводах методом граничных интегральных уравнений. // Известия ВУЗов. Строительство. – 2010. – № 8, С. 32 – 38.

5. Гахова Л.Н. Термонапряженное состояние многослойного сталежелезобетонного водовода в составе конструкции гидротехнического сооружения. // Труды Х международной научной конференции «ГЕО-Сибирь-2014», – Новосибирск: СГГА, 2014. – №4, С.48 – 52.

© Л. Н. Гахова, 2015

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ОСНОВАНИЕМ

Людмила Ивановна Гендлина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Евгения Григорьевна Куликова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)217-05-19, e-mail: shevchyk@ngs.ru

Владимир Михайлович Усольцев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Рассмотрено контактное динамическое взаимодействие упругого рабочего органа с основанием. Установлено влияние физико-механических свойств и конструктивных параметров основания на динамику вибросистемы. Показана адекватность расчетных данных результатам физического моделирования.

Ключевые слова: численная модель, упругий рабочий орган, упругое основание, контактное взаимодействие, контактная жесткость, адекватность.

NUMERICAL MODELING OF VIBRATION BETWEEN ELASTIC OPERATING MEMBER AND THE BASE

Lyudmila I. Gendlina

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Vibration Equipment Laboratory, tel. (383)217-06-12, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Evgenia G. Kulikova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Researcher, Vibration Equipment Laboratory, tel. (383)217-05-19, e-mail: shevchyk@ngs.ru

Vladimir M. Usoltsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Researcher, Vibration Equipment Laboratory, tel. (383)220-14-98

The paper gives an analysis of contact dynamic interaction between an elastic operating member and the base. The influence of physico-mechanical and design parameters of the base on the vibration system dynamics is estimated. The authors demonstrate the conformity between the calculation data and the physical modeling results. Key words: numerical modeling, elastic operating member, elastic base, contact interaction, contact stiffness, conformity.

Динамика вибромашин с упругим рабочим органом [1,2] исследуется как на физических моделях, так и с использованием методов математического моделирования. При создании математических моделей в качестве расчетной схемы принимается балка, свободно размещенная на сплошном упругом основании, жесткость которого определяется параметром, называемым коэффициентом постели [3]. Предполагается, что реакция основания в каждой его точке пропорциональна прогибу балки. Такое допущение существенно упрощает задачу, но искажает реальную картину взаимодействия рабочего органа с основанием.

Современные программные комплексы, в частности ANSYS, позволяют моделировать связь балки с упругой опорной поверхностью в более точной постановке, рассматривая их взаимодействие как контактную задачу теории упругости.

Основной характеристикой, определяющей свойства основания, является жесткость, которая зависит от модуля упругости материала, из которого оно выполнено [4].

В вибромашинах с упругим рабочим органом основание, как правило, выполняется из многослойной резино-тканевой конвейерной ленты. Модуль упругости таких материалов находится экспериментально. Было выбрано три образца конвейерной ленты, отличающихся модулем упругости и толщиной. Для каждого образца, используя универсальную сервогидравлическую испытательную машину Instron 8802, установлена зависимость напряжения сжатия σ от относительной деформации Δ (рис. 1). Как следует из рисунка, зависимости хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что позволило, используя закон Гука, определить модуль упругости каждого образца.



Рис. 1. Зависимости напряжения сжатия от относительной осевой деформации: 1, 2, 3 – образцы материала упругого основания

Схема контактного взаимодействия балки с основанием показана на рис. 2. По одной поверхности упругое основание 2 свободно контактирует с балкой 1, а по противоположной – жестко закреплено. В случае отсутствия вынуждающей силы контакт обеспечивается только за счет веса балки.



Рис. 2. Схема взаимодействия упругого рабочего органа 1 с основанием 2: *а*, *б* – отрыв и сближение контактных поверхностей соответственно; *в* – распределенные нормальные силы на границе контакта

При построении математической модели выполнялись следующие условия [5].

1. Проникновение балки в упругое основание отсутствует

$$\Delta = (\overline{y_1} - \overline{y_2}) / \overline{n} \ge 0,$$

где Δ - нормальный зазор между поверхностями в месте контакта (рис. 2, *a*); $\overline{y_1}$, $\overline{y_2}$ – радиусы-векторы точек балки и упругого основания, вступающих в контакт, соответственно; \overline{n} – единичный вектор нормали к контактной поверхности.

Контакт возникает на границе нижней поверхности балки и верхней поверхности упругого основания (рис. 2, δ). Нормальный зазор Δ при этом равен нулю. При отрыве балки от основания зазор между ними определяется радиусами-векторами точек контактирующих поверхностей.

2. Распределенные нормальные силы на границе контакта, действующие как на балку, так и на упругое основание, должны быть только сжимающими (рис. 2, e):

$$t_1 = \overline{t_1} / \overline{n} \leq 0, \qquad t_2 = \overline{t_2} / \overline{n} \leq 0,$$

где $\bar{t_1}$, $\bar{t_2}$ – векторы распределенных контактных сил, действующих на балку и упругое основание соответственно.

Равенство должно выполняться в случае выхода балки из контакта с основанием, а неравенство – при наличии контакта.

При использовании программного комплекса ANSYS балка была разбита на двухмерные элементы BEAM 3, упругое основание – на двухмерные

8-узловые элементы PLANE 183. Контактные пары формировались с помощью элементов TARGE169 (балка) и CONTA172 (упругое основание) [6].

С целью проверки адекватности результатов численного моделирования были проведены эксперименты на физической модели вибропитателя с упругим рабочим органом [7]. Рассмотрены три варианта основания, образцы которых были испытаны, и модули упругости определены. Основания имели одинаковую конфигурацию и отличались только жесткостью на сжатие.

Кроме жесткости основания в экспериментах изменялась также амплитуда и частота вынуждающей силы, измерялась виброскорость колебаний рабочего органа.

На рис. 3 приведены результаты численного и физического моделирования в виде зависимостей амплитуды виброскорости рабочего органа от вынуждающей силы в точке ее приложения при коэффициентах жесткости основания $2.15 \cdot 10^{10}$ H/m² и $0.41 \cdot 10^{10}$ H/m². Следует отметить, что результаты, полученные численным методом, с большой точностью подтверждаются экспериментом (графики 1*a* и 1*b*, 2*a* и 2*b*, рис.3).

Из графиков следует, что изменение жесткости основания оказывает неоднозначное влияние на амплитуду колебаний рабочего органа. При малых вибрациях увеличение жесткости основания в 5 раз вызывает снижение амплитуды виброскорости в 1.5 – 2.0 раза.

С повышением интенсивности колебаний за счет увеличения частоты изменяются условия контакта, и при пятикратном увеличении жесткости опорной поверхности амплитуда виброскорости возрастает менее чем в 1.2 раза, то есть влияние основания становится менее значительным.



Рис. 3. Зависимость амплитуды виброскорости рабочего органа от вынуждающей силы в точке ее приложения: *а*, *б* – результаты физического и математического моделирования соответственно;

коэффициент жесткости основания $k_{\rm n}$: 1 – 2.15·10¹⁰ H/м², 2 – 0.41·10¹⁰ H/м²

Резкое кратковременное увеличение амплитуды виброскорости объясняется эффектом резонанса. Частота источника вибрации совпала с одной из собственных частот вибросистемы, которая, как следует из рисунка 3, зависит от жесткости основания. Однако эту зависимость трудно считать существенной, так как для системы с основанием жесткостью $k_n=0.41 \cdot 10^{10}$ H/м² собственная частота f = 19 Гц, а для системы, в которой жесткость основания в 5 раз выше

и составляет $k_{\rm m} = 2.15 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2 - f = 20 \ \Gamma$ ц, то есть частоты отличаются только на 1 Гц.

Таким образом, показано, что результаты численного моделирования контактного взаимодействия упругого рабочего органа и основания адекватны аналогичным результатам физического моделирования. Это позволяет уточнить математическую модель динамики виброустройств с упругим рабочим органом, расширить возможности численного эксперимента и повысить достоверность получаемых результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гендлина Л.И., Еременко Ю.И., Куликова Е.Г., Левенсон С.Я. Совершенствование процесса вибрационного выпуска связных материалов из емкости. // Горное оборудование и электромеханика.– М. – 2006. – № 7, С.42–45.

2. Тишков А.Я., Гендлина Л.И., Еременко Ю.И., Левенсон С.Я. Вибрационное воздействие на сыпучую среду при выпуске ее из емкости. // ФТПРПИ. – 2000.– № 1.

3. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение. – 1985.

4. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение. – 1971.

5. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск: Издво СО РАН. – 2000.

6. Решение контактных задач в ANSYS 6.1 – М.: Cadfem – 2003.

7. Гендлина Л.И., Левенсон С.Я., Алесик М.Ю., Куликова Е.Г. О влиянии параметров вибрационного устройства на процесс выпуска связных материалов из емкости. // Горное оборудование и электромеханика. –М. – 2013. – №1, С.43–46.

© Л. И. Гендлина, Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев, 2015

УДК 621.23.05

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ ПРОКОЛА

Борис Борисович Данилов

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

Дмитрий Олегович Чещин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

В работе представлен обзор и анализ существующих способов управления траекторией движения пневмопробойника. Предложена принципиальная конструктивная схема механизма изменения траектории движения пневмопробойника. Приведены результаты испытаний макета управляемого пневмопробойника.

Ключевые слова: скважина, пневмопробойник, бестраншейные технологии, скважины криволинейной траекторией, корректировка траектории пневмопробойника.

METHOD AND TOOL FOR CURVED HOLE MAKING BY PUNCTURING

Boris B. Danilov

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

The paper gives a review and analysis of the existing methods of air percussion machine motion trajectory control. The authors propose general layout of a tool for changing the motion trajectory of air percussion machines. The steerable air percussion machine test data are presented.

Key words: hole, air percussion machine, trenchless technology, curved trajectory hole, air percussion machine trajectory alignment.

В современном мире одним из основных методов образования вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин в грунте является метод бурения. Интенсивное развитие получило направленное бурение, в процессе которого осуществляется корректировка направления скважин. Этот метод применяется при бурении направленных скважин в угольных пластах (например, для отвода метана), при разработке нефтяных месторождений, при строительстве коммуникаций различного назначения [1]. Применение направленного бурения в строительстве позволяет сохранить благоустройство территории, зеленые насаждения, и особенно важно, исключить остановку транспортных потоков на авто и железнодорожных магистралях.

Распространенный в данное время метод гидравлического бурения имеет ряд недостатков, которые не позволяют его использовать в определенных условиях строительства [2]. Сухое бурение (с помощью штанг со шнеками) имеет ограничение по длине прокладываемой скважины, обусловленное высокой вероятностью чрезмерного отклонения оси скважины от проектной в связи с невозможностью корректировки траектории рабочего органа.

Альтернативный метод образования скважины – метод прокола. Он характеризуется наибольшей простотой процесса и компактностью применяемого оборудования. Этот метод позволяет проходить скважины небольшого диаметра (до 300 мм) в прочных грунтах, а также применяется для проходки пионерной скважины с последующим ее расширением. Увеличение длины скважин свыше 30 метров сопровождается уменьшением вероятности его выхода в проектную конечную точку вследствие возрастающего действия случайных отклоняющих факторов [3]. Существенно расширить технологические возможности этого метода возможно за счет обеспечения возможности движения рабочего органа по заданной траектории, в том числе и криволинейной, и выхода скважины в заданную область подземного пространства.

Через некоторое время, после создания в ИГД СО РАН надежно работающих пневмоударных машин (пневмопробойников), началась разработка управляемых пневмопробойников. Этой проблемой в разное время занимались и зарубежные производители пневмопрбойников (Trakto-Technik, Vermeer (Германия), Allied Steel, Ditch Witch (США)) [4]. Несмотря на то, что были достигнуты определенные успехи и созданы достаточно работоспособные машины и механизмы, в своем большинстве они остались, или техническим предложением, или опытным образцом.

В настоящее время в ИГД СО РАН разработан и испытан управляемый пневмопробойник по схеме изменения его внешней формы за счет отклонения хвостовой части (рис. 1). Такое решение продиктовано несколькими обстоятельствами. Во-первых, заднее расположение отклоняющего элемента позволяет в полной мере использовать для ударного механизма отработанные и выверенные конструктивные решения, применяемые в серийных машинах. Вовторых, диаметр корпуса в рассматриваемой конструктивной схеме равен диаметру образуемой скважины, что позволит сохранить величину удельной мощности машины. В-третьих, заднее расположение отклоняющего элемента позволяет упростить конструкцию механизма управления за счет использования воздухоподводящего рукава для передачи управляющих команд.

Механизм (рис. 1) представляет собой отклоняющий хвостовик 4, который шарнирно соединяется с задней гайкой 1 пневмопробойника 8 посредством гайки 2 и втулки 3. Для создания отклоняющего усилия в устройство вмонтирована эластичная камера 7, управляемая с помощью клапанного механизма 6. Выбор направления, в котором необходимо отклонить пневмопробойник, осуществляется поворотом воздухоподводящего шланга (рукава) 5. Для отклоне-

ния корпуса пневмопробойника в эластичную камеру через клапанный механизм подается давление. Камера создает усилие, которое поворачивает хвостовик относительно втулки 3 и корпуса пневмопробойника 8 на некоторый угол α.



Рис. 1. Схема механизма управления траекторией пневмопробойника (при отклоненном хвостовике)

Действующая модель такого управляемого пневмопробойника была изготовлена и испытана в стендовых и полевых условиях. В процессе испытаний угол отклонения хвостовика составлял $\alpha \approx 4^{\circ}$, длина корпуса пневмопробойника $L_1=1380$ мм, длина хвостовой части $L_2=280$ мм. Стендовые испытания проводилась в специальном грунтовом канале. В соответствии с полученными данными построена траектория движения пневмопробойника в грунтовом канале (рис. 2).



Рис. 2. Траектория движения пневмопробойника в грунтовом канале

На рисунке по оси X измеряется длина полученной скважины (в горизонтальной проекции), а по оси Y – изменение положения пневмопробойника в вертикальной плоскости. Угол γ – наклон продольной оси пневмопробойника к горизонту.

Испытания пневмопробойника в грунте естественного сложения производились на территории инженерно-технического комплекса ИГД СО РАН «Зеленая Горка», где были сооружены стартовый и приемный котлованы. Проходка скважины производилась без остановок до выхода пневмопробойника в приемный котлован. Для определения пространственной ориентации оси сооруженной скважины использовалось серийное электронное устройство для определения местоположения и пространственной ориентации рабочего органа установки направленного горизонтального бурения. Электромагнитный излучатель устройства протягивался по скважине. Сигнал излучателя принимался и обрабатывался приемником на поверхности. В соответствии с полученными данными построена траектория движения пневмопробойника в естественном грунте (рис. 3).



Рис. 3. Траектория движения пневмопробойника в грунтовом массиве

Оценка результатов испытаний показала, что отклоняющее устройство предложенной конструкции позволяет достигать отклонения оси скважины на величину в среднем до 80 мм на метр длины. Анализ результатов исследований прямолинейности скважин, проводившиеся в ИГД СО РАН Костылевым А.Д., Чепурным Н.П. и другими исследователями показал, что для скважины такого же диаметра ее отклонение от первоначального направления на длине 25 метров в различных типах грунтов в среднем составляет величину около 150 миллиметров или 6 миллиметров на метр [5].

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что выбранный способ корректировки траектории и предложенное конструктивное решение механизма корректировки направления пневмопробойника позволит компенсировать воздействие большинства случайных отклоняющих факторов и обеспечить выход скважины в заданную область подземного пространства. Кроме того, появляется возможность прокладки скважин методом прокола с заведомо криволинейной траекторией для коммуникаций диаметром как до 300 мм, так и более (путем расширения с помощью сухого бурения). В настоящее время ведется разработка математической модели устройства с целью оптимизации параметров отклоняющего механизма и более точной оценки возможностей управляемых пневмопробойников различного типоразмера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапенко А. Особенности горизонтального бурения [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tehsovet.ru /article-2012-12-3-1468

2. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий. / М.: Пресс Бюро № 1. – 2005.

3. Суднишников Б.В., Костылев А.Д., Тупицин К.К. Пневмопробойники в строительстве и горном деле. // ФТПРПИ. – 1970. – № 2, С. 44 – 49.

4. Костылев А.Д. Опыт создания управляемых пневмопробойников // ФТПРПИ. – 1996. – № 6, С. 77 – 82.

5. Пневмопробойники. / Под ред. К.С. Гурков, В.В. Климашко, А.Д. Костылев и др. – Новосибирск: Институт горного дела СО АН СССР. – 1990.

© Б. Б. Данилов, Д. О. Чещин, 2015

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ПРОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Борис Борисович Данилов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Борис Николаевич Смоляницкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Дмитрий Олегович Чещин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Обсуждаются подходы к созданию бурового инструмента и оснастки для направленного бурения скважин в прочных горных породах при разведке и разработке полезных ископаемых и при подземном строительстве объектов инфраструктуры и коммуникаций. Приводится обоснование принципов работы и конструктивных схем механизмов, позволяющих отклонить буровой рабочий орган в нужную сторону.

Ключевые слова: скважина, направленное бурение, управляющее воздействие, рабочий орган, вращение, подача, отклонение.

PROSPECTS FOR DIRECTIONAL HOLE DRILLING TECHNOLOGIES IN HIGH STRENGTH ROCKS

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 Technology and Equipment, tel. (383)217-01-33; e-mail: bbdanilov@mail.ru

Boris N. Smolyanitsky

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

Dmitry O. Cheshchin

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

The paper presents a discussion of approaches to designing a drill tool and accessories for directional hole drilling in high strength rocks during mineral exploration and mining and in the course of various purpose underground construction. The authors substantiate operating modes and structural layouts of devices intended to divert the drill tool in the required direction.

Key words: drilling tool, hole, rotation, advance, diversion, control action, directional drilling.

Бурение скважин в породном массиве является важной составной частью технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, их добычи, как подземным, так и открытым способами. Кроме того, бурение скважин широко используется для выполнения специальных работ в подземном строительстве.

Горные и строительные буровые технологии имеют ряд отличий, вытекающих главным образом из особенностей и свойств породных массивов, в которых сооружаются скважины. В подземном строительстве бурение скважин чаще всего осуществляется в грунтах при сооружении различных инженерных коммуникаций. Поскольку грунт при механическом воздействии может уплотняться, то кроме бурения здесь используются и другие методы сооружения скважин (прокол, продавливание). Именно эти методы первоначально являлись основой бестраншейных технологий прокладки коммуникаций [1,2]. Буровые строительные технологии получили ускоренное развитие сравнительно недавно. Этому способствовало то, что насыщенность подземного пространства различными коммуникациями сделала все более востребованными технологии сооружения скважин с гарантией попадания в заданную область подземного пространства. При этом возросли требования к обеспечению безопасности ведение работ за счет снижения рисков обрушения породного массива, повреждения находящихся рядом объектов. Поэтому применение направленного бурения в промышленных масштабах стало рентабельным.

В горном деле бурение является основным и чаще всего безальтернативным способом проходки скважин. В силу широкого разнообразия прочностных свойств породных массивов сформировалось несколько способов бурения, отличающихся главным образом по способу воздействия на разрушаемую часть породного массива (вращательный, ударный, ударно-вращательный, ударноповоротный способы) [4]. Одной из особенностей современного этапа развития технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых является вовлечение в производство все более глубоко залегающих месторождений, при этом часто характеризующихся сложными горно-геологическими условиями. Это потребовало развития технологий бурения скважин [4-6], обеспечивающих увеличение длины и возможности их точного выхода в заданную область подземного пространства. Как и в случае с подземным строительством, закономерно началось ускоренное развитие методов направленного бурения.

Первоочередными объектами использования направленных скважин в настоящее время являются морские месторождения углеводородов; месторождения на территории с ограниченной возможностью ведения буровых работ; 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; увеличить степень извлечения углеводородов на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки; вовлечь в разработку пласты с низкими коллекторскими свойствами и с высоковязкой нефтью; освоить труднодоступные нефтегазовые месторождения.

Использование горизонтального направленного 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. Кроме совершенствования технологий 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 дегазации угольных месторождений и т.д. [4-6].

Таким образом, общей задачей совершенствования буровых технологий, как в горном деле, так и в подземном строительстве, является развитие методов и технических средств, позволяющих прокладывать скважины с возможностью корректировки траектории для выхода в нужную область подземного пространства.

Для сооружения направленных скважин используются специальные устройства и механизмы, позволяющие изменять траекторию движения рабочего органа по команде оператора [2]. Они позволяют компенсировать влияние практически всех разнонаправленных отклоняющих факторов, являющихся причиной изменения первоначального курса. Кроме того, управляемый рабочий орган позволяет прокладывать скважины со сложной траекторией, включающей повороты в разных плоскостях.

В практике создания различных конструкций управляемых рабочих органов в основном используется два способа создания отклоняющего усилия: за счет изменения формы рабочего органа и за счет изменения направления усилия подачи. Значительно реже для изменения направления скважины используется отклоняющие механизмы, действие которых основано на смещении центра тяжести рабочего органа. Кроме перечисленных, в литературе описан еще один способ отклонения – за счет изменения свойств породного массива с одной стороны от рабочего органа [3]. Теоретически, такое воздействие может производить ожидаемый эффект. Практическая же реализация способа представляется весьма сложной задачей. Примеров успешного создания подобных механизмов, пригодных для практического использования авторам неизвестно.

В установках направленного бурения, использующихся в подземном строительстве, управление траекторией проходки обеспечивается применением бурового инструмента в виде одностороннего клина [2]. При вращении инструмента наклонная плоскость клина постоянно изменяет свое положение, в результате чего отклонения от траектории не происходит. Для корректировки направления проходки вращение останавливают и продолжают поступательное движение инструмента. Направление отклонения определяется ориентацией рабочей плоскости асимметричного клина. По сути, скважина на этапе изменения траектории формируется за счет вытеснения грунта в радиальном направлении при поступательном внедрении рабочего органа в грунтовый массив. При этом происходит реструктуризация грунта, сопровождающаяся повышением его плотности на стенках скважины и в некотором объеме вокруг нее.

Для корректирования траектории бурового инструмента в твердых горных породах такой способ изменения траектории становится непригоден. Поэтому установки оснащаются дополнительным механизмом, который попеременно поворачивает инструмент в разные стороны на небольшой угол, осуществляя так называемый «карвинг» [7, 8]. За счет этого достигается разрушение породы над плоскостью клина, и последующее отклонение инструмента в образовавшееся свободное пространство. Для безаварийной работы буровой установки необходимо предотвратить возможность раскручивания резьбовых соединений звеньев буровой колонны, что в целом приводит к существенному усложнению станка и технологической оснастки.

Анализ результатов исследований направленной проходки скважин и накопленного опыта по созданию отклоняющих механизмов позволяет сделать вывод о том, что изменять траекторию скважины наиболее просто и целесообразно за счет использования отклоняющего механизма, установленного непосредственно на буровой рабочий орган. Его действие основано на изменении внешней формы рабочего органа на этапе изменения траектории скважины. При этом на прямолинейных участках буровой орган остается симметричным относительно его продольной оси.

В качестве бурового рабочего органа помимо инструмента вращательного действия часто используются погружные или внешние генераторы ударных импульсов, повышающие интенсивность воздействия на буровой инструмент при проходке скважин в прочных горных породах. На рис. 1 представлен вариант конструктивной схемы такого механизма, предназначенного для ударновращательного бурения погружным пневмоударником.

Для создания отклоняющего усилия в пневмокамеру 6 подается давление. Камера надувается и отклоняющие элементы 3, 4 одним краем опираются на стенку скважины. При этом создается радиально направленное отклоняющее усилие, обеспечивающее изменение траектории проходки скважины. Поскольку сохраняется возможность вращения вала 2, то процесс бурения не прекращается.

Сделанный краткий анализ свидетельствует о том, что на сегодняшний день ни в России, ни за рубежом до конца не решена научно-техническая задача управления траекторией проходки скважины при ударно-вращательном способе бурения погружным пневмоударником [3,5,8]. Намечены лишь подходы к её решению.



Рис. 1. Конструктивная схема отклоняющего механизма для направленного бурения скважин в прочных горных породах:

1 – генератор ударных импульсов с буровым инструментом; 2 – вал; 3, 4, - отклоняющие элементы; 5 – воздушный канал; 6 – пневмокамера

Создание буровых установок ударно-вращательного действия, обеспечивающих проходку скважин по управляемой траектории в массиве прочных горных пород, и организация выпуска такого оборудования на отечественных предприятиях усилит конкурентные позиции отечественной буровой техники и обеспечит перспективы для развития прорывных технологий в горнодобывающей отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Б.Б. Пути совершенствования технологий и технических средств для бестраншейной прокладки коммуникаций. // ФТПРПИ. – 2007 – № 2, С. 69 - 75.

2. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий. // М.: Пресс Бюро. – 2005. – № 1.

3. Смоляницкий Б.Н., Репин А.А., Данилов Б.Б. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. // отв. Ред. Б.Ф. Симонов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела им. Н.А. Чинакала, СКТБ «Наука» КНЦ, Ин-т химии твердого тела и механохимии и др. – Новосибирск: Издво СО РАН. – 2013. – 204 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 43).

4. Вэн Жон. Внедрение техники направленного бурения в скважине для извлечения и добычи угольного метана. // Науковіпраці. ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». Вип. 14 (181). – 2011, С. 114 – 121.

5. Клишин В.И., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б., Гуртенко А.П. Станок для бурения разведочных, дегазационных и технических скважин СБР-400. // ФТПРПИ. – 2010. – № 4, С. 50 – 55.

6. Маметьев Л.Е., Ананьев А.Н., Любимов О.В., Жалнин Д.В. О перспективах бурения горизонтальных скважин в подземных условиях //. – 2000. – № 11, С. 68 – 69.

7. Буровые коронки TriHawk. http://www.ditchwitch.ru.

8. FORWARD HDD Новое оборудование в мире ГНБ. / Технологии мира. – 2011. – № 10.

© Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, Д. О. Чещин, 2015

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Екатерина Вячеславовна Денисова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории горной геофизики, тел. (383)217-09-52, e-mail: slimthing@mail.ru

Антон Игоревич Конурин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, тел. (383)217-09-52, e-mail: akonurin@yandex.ru

Алексей Павлович Хмелинин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник лаборатории диагностики механического состояния горных пород, тел. (383)217-05-15, e-mail: zubrm@ngs.ru

В ИГД СО РАН разработаны и реализованы новые системы для определения местоположения рабочих органов породоразрушающих устройств. Отличительной особенностью предложенных систем по сравнению с существующими мировыми аналогами являются минимальное вмешательство в конструкцию машины, простота реализации технического устройства. Представлены результаты испытаний систем в реальных условиях.

Ключевые слова: акустический сигнал, породоразрушающий инструмент, геосреда, местоположение объекта.

CONTROL SYSTEMS FOR ROCK DESTRUCTION TOOL MOTION TRAJECTORY IN ROCK MASS

Ekaterina V. Denisova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Rock Geophysics Laboratory, tel. (383)217-09-52, e-mail: limthing@mail.ru

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Physico-Technical Geotechnologies Laboratory, tel. (383)217-09-52, e-mail: akonurin@yandex.ru

Aleksey P. Khmelinin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Rock Mass Diagnostics Laboratory, tel. (383)217-05-15, e-mail: zubrm@ngs.ru

The Institute of Mining SB RAS has developed and embodied new systems for rock destruction tool positioning. The basic features of the new systems as against the existing analogs in the world are minimum modification of the design structure and simplicity of embodiment. In situ testing data of the systems are presented.

Key words: acoustic signal, rock destruction tool, geomedium, object location.

Проходка скважин широко используется в горном деле и строительстве не только для технологических целей при добыче полезных ископаемых или для прокладки подземных коммуникаций, но и для диагностики и контроля напряжённо-деформированного состояния массивов горных пород, получения непосредственной информации об их физико-механических свойствах.

Существующие зарубежные и отечественные контрольно-измерительные системы (фирмы Digital Control Inc., НПИ «Сенсе»; системы Eclipse, SNS-200, SNS-300 и т.п.), применяемые в системах горизонтального направленного бурения, определяют координаты буровых снарядов с помощью установленных в них передающих антенн, сигналы от которых принимаются на поверхности земли, позволяя вычислить искомые координаты [1,2]. Однако использование данных систем в установках ударно-вращательного бурения весьма ограничено, поскольку передающие антенны подвержены значительным ударным перегрузкам, что приводит к их быстрому выходу из строя [3]. Более рациональным является использование непосредственно создаваемых буровым снарядом породоразрушающей машины акустических импульсных сигналов на поверхности обнажения. Их регистрация и анализ позволяют устанавливать местоположение бурового снаряда, а следовательно, и забоя проходимой скважины.

В Институте горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН разработаны акустические системы определения местоположения пневмоударной машины в породном массиве:

Многоканальная акустическая измерительная система (далее МАИС). Фотография макетного образца и схема размещения акустоэлектрических преобразователей на поверхности Земли представлены на рис. 1. Суть работы системы заключается в вычислении координат машины по временам задержки поступления сигнала в приемные каналы (1...4) многоканальной акустической измерительной системы относительно опорного акустического сигнала непосредственно с рабочего органа (5).

Перед началом работы производится калибровка системы – определяют скорость V распространения упругих волн в грунте. Зная исходные координаты пневмоударной машины, по временам t_A , t_B , t_C , t_D задержки прихода импульса в точки A, B, C, D для каждого из блоков обработки импульсного акустического сигнала $3_2...3_5$ в блоке вычисления пространственных координат машины 8 вычисляют скорости V_A , V_B , V_C , V_D распространения упругих волн в грунтовом массиве, что позволяет учесть возможную неоднородность его свойств. Далее вычисляют три координаты излучателя 1.

Исходные данные для вычисления координат излучателя 1: a = AB = CD; b = AD = BC; h = AK - глубина запуска; <math>l - длина машины. Начало координат принято в точке A.





- Рис. 1. Схема проведения натурного эксперимента (а) и фотография макетного образца измерительного комплекса МАИС (б):
 - 1...5 измерительные акселерометры KD29, 6 фундамент здания на расстоянии 2 м от акселерометров 2-3, 7 пневмоударная машина «Тайфун-2»

При заглублении пневмоударной машины в грунтовый массив на всю длину *l* координаты точки *O*, где формируется импульсный акустический сигнал,

относительно начала координат на рисунке 5 будут равны $x = \frac{b}{2}, z = h, y = l$.

Зная эти координаты, находят значения скоростей V_A , V_B , V_C , V_D распространения импульсного акустического сигнала до каждого акустоэлектрического преобразователя $2_1...2_4$ из системы уравнений:

После ударного воздействия рабочего органа пневмоударной машины на грунтовый массив, происходит перемещение точки O, где формируется импульсный акустический сигнал, в точку удара O'. По известным скоростям V_A , V_B , V_C , V_D распространения упругих волн в грунте и временам t_A , t_B , t_C , t_D задержки их распространения в нем вычисляют расстояния от точки удара O' до акустоэлектрических преобразователей $2_1...2_4$:

$$\int O'A = V_A \times t_A \qquad \int (O'A)^2 = x^2 + y^2 + z^2$$
(2)

$$\begin{cases} O'B = V_B \times t_B \implies \\ O'C = V \times t \implies \\ O'C)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2 \end{cases}$$
(3)

$$\begin{bmatrix} O'C = V_C \times t_C \\ O'C)^2 = (b-x)^2 + (a-y)^2 + z^2 \end{bmatrix}$$
(4)

$$\left[O'D = V_D \times t_D \quad \left(\left(O'D\right)^2 = (b-x)^2 + y^2 + z^2 \right) \right]$$
(5)

Из системы уравнений (2-5) вычисляют координаты источника акустического сигнала. Таким образом, зная координаты рабочего органа пневмоударной машины в любой момент времени, можно контролировать процесс проходки скважины геомеханического контроля и исключить искривление ее ствола.

Определение пространственных координат пневмоударной машины в грунтовом массиве при y = 250 мм, показало, что относительная погрешность определения координат *z* и *x* составила в среднем 4-6%. Данное утверждение справедливо при контроле отклонения пневмоударной машины влево от оси ее движения. Относительная погрешность определения координат машины при моделировании ее отклонения вправо от требуемой траектории резко снижается (до 15-20%). Это можно объяснить наличием слева от места сооружения скважины фундамента и бетонной отмостки здания (на расстоянии 2 м), которые привели к возникновению явления отражения акустической волны на границе раздела сред "грунт-бетон".

Другая разработка – двухканальный обнаружитель местоположения пневмоударной машины, работа которого происходит следующим образом:

Два акустоэлектрических преобразователя располагают на поверхности Земли на равных расстояниях от проекции на дневную поверхность проектной оси движения пневмоударной машины Тайфун-2. Акустический сигнал после усиления и фильтрации поступает на умножитель и далее на устройство обработки информации. При движении машины по проектной траектории амплитуда напряжения на выходе обнаружителя будет максимальной. Уменьшение амплитуды сигнала характеризует отклонение машины от заданной траектории движения, а по разности амплитуд сигнала в каждом канале определяется, в какую сторону произошло отклонение.

Выполненные натурные испытания опытного образца разработанного устройства показали, что при одинаковом отклонении машины от проектной траектории (100 мм) амплитуда акустического сигнала после использования операции умножения при обработке принятых сигналов на выходе обнаружителя уменьшается на 32%, а без нее – на 16%. Это подтверждает вывод о том, что прием полезного сигнала по двум каналам с применением операции умножения позволяет повысить точность определения местоположения пневмоударной машины, как минимум, в два раза по сравнению с использованием сигнала без обработки.

Таким образом, предложенные варианты технических решений акустических устройств, предназначенных для определения местоположения пневмоударной машины в породном массиве, подтвердили свою работоспособность в реальных условиях прокладки подземных коммуникаций и обеспечили требуемую точность 4-6%.





Рис. 2. Двухканальный обнаружитель местоположения пневмоударной машины: а – опытный образец, б – испытания в натурных условиях

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В.Н., Денисова Е.В. Принципы построения радиочастотных систем навигации для бестраншейных технологий прокладки подземных коммуникаций. / Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2011.

2. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). – М.: Пресс Бюро. – № 1. – 2005.

3. Тареева Е.А. Инновационные разработки для проведения буровых работ методом горизонтального направленного бурения. // Нефть. Газ. Новации. – Самара: ООО «Нефть. Газ. Новации». – 2013. – №3.

4. Наговицын А.Л. Отказы электронных зондов для установок горизонтально направленного бурения: причины и следствия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gnb-electronics.ru/zagruzki.

5. Наговицын А.Л. Энергопотребление буровых зондов для ГНБ с батарейным питанием. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gnb-electronics.ru/zagruzki.

6. Опарин В.Н., Денисова Е.В., Хмелинин А.П., Бадмаева Я.З., Полотнянко Н.С. Многоканальная акустическая система контроля процесса движения пневмоударной машины в грунтовом массиве и алгоритм обработки измерительной информации. // ФТПРПИ. – 2014. – № 3, С. 187 – 197.

7. Патент на полезную модель №136589. Измеритель координат работающей пневмоударной машины. / Е.В. Денисова, В.Н. Опарин, А.П. Хмелинин, А.И. Конурин. // Опубл. Бюл. – №1. – 2013.

8. Патент на полезную модель №116573. Акустический обнаружитель горизонтального местоположения источника звука в грунте. / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, А.И. Конурин // Опубл. Бюл. – № 15. – 2012.

© Е. В. Денисова, А. И. Конурин, А. П. Хмелинин, 2015

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕГО ОТВАЛА НА ШУБАРКОЛЬСКОМ УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ

Виктор Николаевич Долгоносов

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: vdolgonosov@gmail.com

Светлана Борисовна Ожигина

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: osb66@mail.ru

Сергей Павлович Ким

Акционерное общество «Шубарколь комир», 100004, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Асфальтная, 18, кандидат технических наук, вице-президент по техническим вопросам, тел. (7212)44-07-44, e-mail: Sergey.Kim@enrc.com

Дмитрий Сергеевич Ожигин

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистр, докторант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел.(7212)56-26-27, e-mail: ozhigin.dima@mail.ru

В статье представлена усовершенствованная расчетная схема устойчивости карьерных откосов, расположенных на слабом наклонном основании малой мощности, и обоснованы параметры устойчивого внутреннего отвала для горно-геологических условий Шубаркольского угольного месторождения.

Ключевые слова: расчет устойчивости внутреннего отвала, слабое наклонное основание малой мощности.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF THE INTERNAL DUMP ON SHUBARKOLSKY COAL MINE

Viktor N. Dolgonosov

The Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, doct. of tech.sci., associate professor of «Mine survey and geodesy» department, doctor of engineering, tel. (7212)56-26-27, e-mail: vdolgonosov@gmail.com

Svetlana B. Ozhigina

The Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, cand. of tech.sci., associate professor of «Mine survey and geodesy» department, tel. (7212)56-26-27, e-mail: osb66@mail.ru

Sergey P. Kim

«Shubarkol Komir» joint-stock company, 100004, Kazakhstan, Karaganda, 18 Asfaltnaya St., cand. of tech.sci., vice-president for technical questions, tel. (7212)44-07-44, e-mail: Sergey.Kim@enrc.com

Dmitriy S. Ozhigin

The Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan, Karaganda, 56 Mira Blvd, master, Ph. D., candidate of «Development of mineral deposit» department, tel. (7212)56-26-27, e-mail: ozhigin.dima@mail.ru

The advanced settlement scheme of stability of the career slopes located on the weak inclined basis of low depth is presented in article and justification of parameters of the internal dump for mining-and-geological conditions of the shubarkolsky coal mine.

Key words: internal dumps stability analysis, the weak inclined basis of low depth.

Главной проблемой при формировании внутренних отвалов на разрезах является наличие слабого наклонного основания – почвы угольного пласта, на который производится отсыпка вскрышных пород. С учетом низких прочностных параметров углистых пород в почве пласта обеспечение устойчивости формируемого внутреннего отвала является весьма сложной научной и практической задачей.

Для анализа устойчивости внутрикарьерных отвалов, осыпаемых на слабый контакт – почву отработанного угольного пласта с весьма низкими прочностными характеристиками, усовершенствованы два варианта расчетной схемы устойчивости откосов, расположенных на слабом основании малой мощности (рис. 1).



Рис. 1. Схема откоса на слабом наклонном основании

Суммарные сдвигающие и удерживающие силы, действующие на призму возможного обрушения, определены путем интегрирования соответствующих элементарных сил, действующих по поверхности скольжения

$$T_{c\partial s} = \int dT_{c\partial s} = \int dT_{c\partial s} + \int dT_{c\partial s} + \int dT_{c\partial s}; \qquad (1)$$

$$T_{y\partial} = \int_{DC} dT_{y\partial} = \int_{DM} dT_{y\partial} + \int_{ME} dT_{y\partial} + \int_{EC} dT_{y\partial}.$$
 (2)

При интегрировании сдвигающих и удерживающих сил по потенциальной поверхности скольжения получены конечные решения, выраженные в элементарных функциях. Разработан алгоритм и программное обеспечение для решения данных задач [1].

На основе полученных решений выполнены расчеты устойчивости откосов внутреннего отвала Шубаркольского угольного разреза для углов наклона слабого контакта от 0° до 12°. Результаты расчетов предельной высоты откосов показали, что с уменьшением угла наклона слабого контакта высота устойчивого яруса увеличивается от 15,1 м при $\delta = 12^0$ до 17, 3м при $\delta = 0^\circ$ (табл. 1) [2].

Таблица 1

Угол наклона контакта б, градус	0	2	4	6	8	10	12
Предельная высота яруса H, м	17,3	16,9	16,6	16,2	15,8	15,5	15,1

Результаты расчетов предельной высоты яруса внутреннего отвала

Зависимость предельной высоты устойчивого яруса от угла наклона слабого контакта представлена на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость предельной высоты нижнего яруса от угла наклона слабого контакта

Зависимость носит четко выраженный линейный характер с коэффициентом корреляции равным 0,999. Уравнение связи

$$H_{nped} = 17,29 - 0,1821 \cdot \delta, \ \mathcal{M}.$$
(3)

Исследованиями установлено, что высота устойчивого нижнего яруса отвала при углах наклона слабого обводненного основания до 12° может быть рекомендована равной 15 м. При формировании нижнего яруса из прочных пород надугольной толщи на сухом основании высота устойчивого яруса может достигать 20 м. Ярусы внутреннего отвала, расположенные выше и сложенные достаточно прочными породами, в основании которых будут находиться устоявшиеся породы нижнего яруса, могут иметь высоту до 20м, устанавливаемую из технологических соображений. Высота яруса отвала глинистых пород не должна превышать 15 м.

Разработана методика построения профиля многоярусного внутреннего отвала. Произведены расчеты и установлены параметры предельных откосов внутреннего отвала: высота отвала и соответствующий ей генеральный угол откоса отвала. При изменении глубины разреза и угла наклона слабого основания соответственно меняется предельная высота отвала и генеральный угол откоса. Для контроля расчеты выполнялись двумя способами – аналитическим (предложенным в [2]) и численно-аналитическим способом. Результаты расчетов показали высокую сходимость результатов, так как максимальное расхождение значений предельной высоты откоса не превысило 2%.



Зависимости предельной высоты отвала от генерального угла откоса для различных углов наклона слабого основания представлены на рис. 3.

Рис. 3. Графики зависимостей предельных параметров откоса отвала для различных значений угла наклона слабого основания

Полученные зависимости позволяют принимать решения о предельной высоте отвала на различных участках при переменном значении угла наклона основания без дополнительных расчетов.

При проектировании внутреннего отвала выполнены расчеты (табл. 2) и определены зависимости предельной высоты нижнего яруса отвала от угла наклона слабого основания при различных прочностных характеристиках пород отвала.

Таблица 2

Угол наклона	Предельная высота яруса H, м (при $\alpha = 35^{0}$)			
контакта	$k = 0,020 \text{ M}\Pi a,$	k = 0,0243 MПa,	$k = 0,035 \text{ M}\Pi a,$	
б, градус	$\rho = 17^{0}$	$\rho = 20^{0}$	$\rho = 26^{\circ}$	
3	15,1	19,7	32,7	
5	15,0	19,4	31,2	
7	15,0	19,1	29,7	
9	14,9	18,8	28,3	
11	14,8	18,5	26,9	

Результаты расчетов предельной высоты нижнего яруса внутреннего отвала

Зависимости носят линейный характер. Уравнения связи имеют следующий вид:

- при k = 0,020 МПа, $\rho = 17^{0}$, $H_{nped} = 15,21 - 0,035 \cdot \delta$, M;

- при
$$k = 0,024$$
 МПа, $\rho = 20^{\circ}$, $H_{nped} = 20,15 - 0,150 \cdot \delta$, M ;

- при
$$k = 0,035$$
 МПа, $\rho = 26^{\circ}$, $H_{npeo} = 34,84 - 0,725 \cdot \delta$, м.

Выводы: выполненные исследования позволили усовершенствовать расчетную схему устойчивости карьерных откосов, расположенных на слабом наклонном основании малой мощности и обосновать параметры устойчивого внутреннего отвала для горно-геологических условий Шубаркольского угольного месторождения. Результаты исследований так же могут быть использованы для проектирования параметров внутренних отвалов угольных разрезов с аналогичными горно-геологическими условиями разработки месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ким С.П., Омаров С.Т., Ожигина С.Б. Маркшейдерское обеспечение устойчивости карьерных откосов Шубаркольского угольного разреза // Междун. науч. прак. конф. «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана (Сагиновские чтения №1)»: сб. науч. трудов в 2 ч. (Караганда, 23-24 декабря 2009 г.).- Караганда: КарГТУ, 2009, ч. II. - С. 168- 171.

2. Долгоносов В.Н., Шпаков П.С., Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Старостина О.В. Аналитические способы расчета устойчивости карьерных откосов: монография. - Караганда: «Санат-Полиграфия», 2009.-332 с.

© В. Н. Долгоносов, С. Б. Ожигина, С. П. Ким, Д. С. Ожигин, 2015

УДК 532.546:622.276.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ ГИДРОФИЛЬНОЙ СРЕДЕ*

Дмитрий Сергеевич Евстигнеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, лаборатория силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)335-94-45, e-mail: dima503@pochta.ru

Андрей Владимирович Савченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Приведены результаты лабораторных исследований по вытеснению керосина водой из пористого гидрофильного образца. Положение фронта вытеснения определялось путём распила образца в фиксированный момент времени и сопоставилось с решением полученным в рамках модели Бакли-Леверетта. В качестве входных параметров модели для расчёта принимались: пористость, проницаемость, относительные фазовые проницаемости гидрофильного материала из которого был изготовлен образец.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, гидрофильная пористая среда, относительные фазовые проницаемости, модель Бакли – Леверетта.

MODELING TWO-PHASE IMMISCIBLE FLUID FLOW IN POROUS HYDROPHILIC MEDIUM

Dmitry S. Evstigneev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, Laboratory for Power Electromagnetic Impulse-Forming Systems, 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, Ph. D., Eng, Senior Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Impulse-Forming Systems, tel. (923)245-75-50, E-mail: sav@eml.ru

The paper reports the laboratory research into water displacement of kerosene from porous hydrophilic specimen. The displacement front was positioned by cutting the specimen at the fixed time and the result matched with the solution obtained in the framework of the Buckley – Leverett model. The input parameters for the model were assumed to be porosity, permeability, relative phase permeabilities of the hydrophilic material the specimen was made of.

Key words: two-phase flow, hydrophilic porous medium, relative phase permeabilities, Buckley – Leverett model.

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 15-05-08824а и 14-05-31395-мол_а.

Эксплуатируемые в настоящее время нефтяные месторождения со временем уменьшают свою нефтеотдачу, особенно на поздних стадиях разработки. Возникает необходимость внедрения новых технологий повышения нефтеотдачи, основанных на фундаментальных достижениях геомеханики и техники и в получении новых знаний о физико-химических процессах проходящих в продуктивных пластах и вмещающих их породах.

Остаточная нефть в пластах может удерживаться в виде: рассеянных ганглий, защемлённых в породе; тонкой плёнки на стенках капилляров и трещин; не вовлеченных в разработку нефтенасыщенных зонах – целиках, находящихся в слагающих нефтяной пласт геоблоках, окруженных по периметру системой трещин. Возникает необходимость определить размеры целиковых зон, количество нефти в них, проследить процесс их формирования. При составлении математической модели нестационарной фильтрации в блочных средах, необходимо задать фильтрационные параметры геоблоков. С этой целью были проведены лабораторные исследования, в результате которых были определены коэффициенты: пористости, абсолютной проницаемости, относительные фазовые проницаемости по керосину и воде на гидрофильном образце. Затем был проведён эксперимент по стационарной фильтрации несмешивающихся жидкостей – воды и керосина, в ходе которого определено положение фронта вытесняющей водной фазы на заданный момент времени. Если экспериментально определённые параметры фильтрации определены правильно, то в рамках модели Бакли-Леверетта можно решить задачу и получить положение фронта водной фазы на заданный расчётный момент времени. Сопоставив расчётное время и время полученное в ходе проведения эксперимента по вытеснению керосина водой, а также расчётное и экспериментально определенное положение фронта водной азы можно судить о том на сколько верно определены фильтрационные параметры образца.

Постановка задачи.

Рассмотрим упрощённую модель двухфазной изотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей — модель Бакли-Леверетта. Предположим, что фазы (воды, нефти, а также скелета/пор) несжимаемы, тогда уравнения баланса масс для каждой из фаз имеют вид:

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

где m – коэффициент пористости, $s = s_w$ – водонасыщенность, s_o – нефтенасыщенность ($s_w + s_o = 1 \implies s_o = 1 - s_w \implies \partial s_o / \partial t = \partial (1 - s_w) / \partial t = -\partial s_w / \partial t$), w_1 – вектор скорости фильтрации вытесняющей фазы, т.е. воды; w_2 – вектор скорости фильтрации вытесняющей фазы, т.е. нефти.

Для каждой из фаз считается справедливым обобщённый закон Дарси для скоростей, без учета гравитационных и капиллярных сил:

$$w_i = -k \cdot k_i(s) / \eta_i \cdot \operatorname{grad} p, \qquad i = 1, 2$$
(2)

где k – абсолютная проницаемость пласта; η_i – коэффициенты динамической вязкости воды и нефти, которые считаем постоянными $\eta_i^0 = const_i$; $k_w(s)$, $k_o(s)$ – фазовые относительные проницаемости для воды и нефти определим по модели Кори:

$$k_{w}(s) = k_{w}^{0} \left[(s - s_{wc}) / (1 - s_{or} - s_{wc}) \right]^{\alpha}$$
(3)

$$k_{o}(s) = k_{o}^{0} \left[\left(1 - s_{or} - s \right) / \left(1 - s_{or} - s_{wc} \right) \right]^{\beta}$$
(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).

Сложив в (1) первое и второе уравнения почленно, получим:

$$\operatorname{div}\left(\overset{1}{w_{1}} + \overset{1}{w_{2}}\right) = 0.$$
(5)

Уравнения (1-5) замыкают систему относительно водонасыщенности и давления. Для решения системы (1-5) необходимо задать:

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

Граничные условия: при x = 0: $s = s^0(0,t)$, $p = p^0(0,t)$ водонасыщенность и давление на нагнетательной стороне образца; при x = L: $p = p_L(L)$, $p_L < p^0$ (давление на эксплуатационной стороне образца).

Предполагая процесс фильтрации стационарным [1], т.е. с заданными постоянными величинами давления на нагнетательной и эксплуатационный границе образца, введем потоковую функцию Бакли-Леверетта [2]:

$$F(s) = w_w / w = k_w(s) / k_w(s) + \eta_0 \cdot k_o(s), \qquad \eta_0 = \eta_w / \eta_o, \ w = w_w + w_o.$$
(6)

Скорости каждой из фаз в (2) примут вид:

$$w_w = F(s)w(t), \quad w_w = (1 - F(s))w(t)$$
 (7)

Подставляя (7) в первое уравнение в (1) получим квазилинейное уравнение первого порядка в консервативной форме:

$$\partial s / \partial \tau + \partial F(s) / \partial x = 0.$$
 (8)

где $\tau = \frac{1}{m} \int_0^t w(t) dt < 0$ – суммарный объем фаз, "прокаченный" за время t.

Для решения (8) необходимо задать начальное распределение водонасыщенности и граничное условие на нагнетательной стороне образца.

Решение задачи стационарной фильтрации.

Для нахождения точного решения задачи (8) введем новую координату $x \equiv X(s, \tau)$ макрочастицы, которая в момент времени τ имеет насыщенность s. Начальное положение этой частицы обозначим через $x^0 = X(s, 0)$. Дифференцируя тождество $x \equiv X(s(x, \tau), \tau)$ по x и по τ , получим:

$$1 = \frac{\partial X}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x}; \quad 0 = \frac{\partial X}{\partial \tau} \frac{\partial s}{\partial \tau} + \frac{\partial X}{\partial \tau}.$$

 $\partial X / \partial \tau = F'(s).$ Используя эти выражения (8) приводится к виду [1]: (9) Общим интегралом, которого будет функция: $X(s, \tau) = \tau F'(s) + x^0(s)$. (10)

В общем случае неявное уравнение (10) решается известными методами [3, 4]. Мы будем пользоваться методом Ньютона-Рапса из [4]. Начало системы координат можно выбрать так, чтобы $x^{0}(s) = 0$.

Общее решение (8) можно записать в виде решения неявного уравнения (10) и условия сопряжения на границе интерфейса:

$$\begin{cases} X(s,\tau) = \tau F'(s), & \tau \ge 0, \quad s \in [0, s_f] \\ s = s_0, & \forall x > x_f, \quad \tau \ge 0. \end{cases}$$
(11)

где s_f – водонасыщенность на фронте разрыва, положение которого определяется координатой x_f .

Значение водонасыщенности на фронте разрыва s_f можно получить решив $s_f = s_0 - \left\lceil F(s_0) - F(s_f) \right\rceil / F'(s_f),$ трансцендентное уравнение: (12) s_0 – водонасыщенность в точке x_0 .

Вычислим положения фронта водной фазы при двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей (вода/керосин) для реального гидрофильного образца цилиндрической формы.

В качестве входных параметров примем следующие величины:

 $d = 30 \, MM$ цилиндра; $L = 90 \, MM$ диаметр _ длина цилиндра; $p^{0}(0,t) = 22540 \Pi a$ _ давление на нагнетательной образца, стороне $p^{0}(L,t) = 0 \Pi a$ – давление на эксплуатаци-F(s)онной стороне образца (считаем, что жидкости истекают при атмосферном давлений), F(s) $\eta_0 = 1,5 \ \text{мПа-c}$ _ вязкость керосина, v=k*x+b $\eta_w = 0,89 \ M\Pi a \cdot c$ – вязкость воды (при темпеdF(s)/ds ратуре 23°С и минерализации NaCl 30 г/л), коэффициенты пористости *m*, абсолютной проницаемости образца k, относительные фазовые проницаемости по керосину и воде $k_{a}(s), k_{w}(s)$ были определены на специализированном стенде «ПИК-ОФП/ЭП».

Определим по (6) потоковую функцию Леверетта F(s) и её производную F'(s) рис. 1.

Найдём точку перегиба графика функции Леверетта F(s) как показано на рис. 1,



Леверетта и её производная

и тем самым определим значение водонасыщенности на фронте s_f . Имея s_f можем определить из (11) положение фронта водонасыщенности x_f в различные моменты безразмерного времени τ . Переход от безразмерного времени τ к размерному t осуществим по формуле $t = (m/w) \cdot \tau$. Результаты расчётов для различных параметров x_f , τ приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

№	Координата фронта водонасыщенности, <i>x_f</i>	Безразмерное время, т	Расчётное время <i>t</i> , <i>c</i>
1.	0,25	0,09	69
2.	0,5	0,18	138
3.	0,75	0,27	208
4.	1	0,36	277

Результаты расчётов положения фронта водонасыщенности *x_f* в различные моменты времени



моменты безразмерного времени au

Сопоставление численного эксперимента с результатами физического моделирования.

Приведём результат распила пористого гидрофильного образца на момент расчётного времени 265 c, до прорыва водной фазы. Параметры образца приведены выше и приняты в расчётах для определения положения фронта водонасыщенности x_f .

Как видно из рис. З положение фронта водонасыщенности x_f совпало с расчётным значением, расчётное время и время проведения эксперимента также совпали с точностью до нескольких секунд, требуемых для распила образца, следовательно экспериментально определённые параметры фильтрации (коэффициенты m, k, $k_o(s)$, $k_w(s)$) определены верно. Расчетный профиль распределение водонасыщенности позволяет определить не только положение фронта водонасыщенности x_f , но и распределение керосинонасыщенности вдоль общего направления фильтрации в любой момент времени.



Рис. 3. Результат вытеснения керосина водой из гидрофильного пористого образца

Заключение. Результаты численного моделирования упрощённой модели стационарной фильтрации в рамках задачи Бакли-Леверетта и эксперимента по вытеснению керосина водой из гидрофильного пористого образца подтверждают, что параметры фильтрации, такие как коэффициенты: пористости, абсолютной проницаемости, относительные фазовые проницаемости по керосину и воде определены правильно и могут быть использованы в дальнейшем при численном моделировании плоской задачи фильтрации из геоблока, окружённого по периметру лабиринтной трещиной с целью определения "целиков" – неподвижных, капиллярно запертых зон, находящихся в динамическом равновесии с обтекающих их флюидом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстигнеев Д.С., Савченко А.В. Решение задачи стационарной фильтрации несмешивающихся флюидов в трещиновато-блочной структуре с учетом капиллярных сил. // Сб. материалов X Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направление и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» в 4 т. – Новосибирск: СГГА. – 2014. – Т. 4, С 85 – 92.

2. Данаев Н.Т., Корсакова Н.К., Пеньковский В.И. Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов. – Алма-Ата: Казахский ун-т. – 2005.

3. Островский А.М. Решение уравнений и систем уравнений. – М.: ИЛ. – 1963.

4. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing. Cambridge. – 2007, p.1262

© Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко, 2015

УДК 631.474+631.452

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К БИОРЕКУЛЬТИВАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ И ВОДОЕМОВ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ

Елена Константиновна Емельянова

ГБОУ ВПО «Новосибирский государственный медицинский университет», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 52, кандидат биологических наук, доцент кафедры гигиены и экологии; Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор», 630559, Россия, Новосибирская область, р. п. Кольцово, старший научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)226-19-25, e-mail: emelelen@gmail.com

Александр Юрьевич Алексеев

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт экспериментальной и клинической медицины», 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экспериментального моделирования и патогенеза инфекционных заболеваний, тел. (383)335-94-05, e-mail: al-alexok@ngs.ru

Александр Михайлович Шестопалов

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт экспериментальной и клинической медицины», 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2, доктор биологических наук, профессор, зав. лабораторией экспериментального моделирования и патогенеза инфекционных заболеваний, тел. (383)335-94-05, e-mail: shestopalov2@ngs.ru

Владимир Аркадьевич Забелин

ЗАО «Биоойл», 630559, Россия, Новосибирская область, р. п. Кольцово, 12, кандидат технических наук, генеральный директор, тел. (383)381-45-13, e-mail: biooil2002@mail.ru

Разработана комплексная технология очистки нефтезагрязненных грунтов и водоемов для условий севера Западной Сибири, включающая в себя экологически безопасные подходы с применением микроорганизмов-деструкторов и фиторекультивационными мероприятиями.

Ключевые слова: нефть, микроорганизмы-деструкторы, биорекультивация, биоремедиация.

ECOLOGY-BASED APPROACHES TO BIO-REMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED SOIL AND WATER IN SIBERIA

Elena K. Emelyanova

Novosibirsk State Medical University, 630091, Russia, Novosibirsk, 52 Krasny prospect, Ph. D. Biology, Assistant Professor, Hygieology and Ecology Department; State Research Center of Virology and Biotechnology VECTOR, 630559, Russia, Novosibirsk Region, Koltsovo, Senior Researcher, Biophysics and Ecological Research Department, tel. (383)226-19-25, e-mail: emelelen@gmail.com

Alexander Yu. Alekseev

Research Institute of Experimental and Clinical Medicine, 630117, Russia, Novosibirsk, 2 Timakova St., Ph. D., Biology, Senior Researcher, Laboratory for Experimental Modeling and Virulent Disease Process, tel. (383)335-94-05, e-mail: al-alexok@ngs.ru

Alexander M. Shestopalov

Research Institute of Experimental and Clinical Medicine, 630117, Russia, Novosibirsk, 2 Timakova St., Dr Biology, Prof, Head of Laboratory for Experimental Modeling and Virulent Disease Process, tel. (383)335-94-05, e-mail: shestopalov2@ngs.ru

Vladimir A. Zabelin

Biooil LLC, 630559, Russia, Novosibirsk Region, 12 Koltsovo, General Director, Ph. D. Eng, tel. (383)381-45-13, e-mail: biooil2002@mail.ru

The developed integrated technology for purification of oil-contaminated soil and water bodies in the north of the West Siberia includes ecologically safe approaches using microorganismsdecomposers and phytorehabilitation.

Key words: oil, microorganisms-decomposers, bio-rehabilitation, bio-remediation.

Негативное воздействие на окружающую среду производится как на территориях освоения месторождений нефти, так и в пределах промысловых и магистральных трубопроводов, объектах хранения, переработки и реализации нефтепродуктов, где происходят аварии, приводящие к загрязнению почвы и водоемов. Особенно остро проблема загрязнения нефтью стоит на севере Западной Сибири, где добывается 70% нефти. На данный момент существуют несколько экологически приемлемых способов избавления от нефтеразливов, включающих применение нефтесборочного оборудования, сорбентов, биопрепаратов, в отличие от разрушающих экосистемы методов землевания песком, взрывов, выжигания. К сожалению, для достижения быстрого видимого эффекта некоторые рекультивационные работы включают в себя засыпку нефтезагрязненной территории песком или торфом, что способствует погружению нефти в нижележащие анаэробные слои залежи и ее консервации на долгие годы. Взрывание и выжигание приводит к полной деградации экосистемы, нарушая многолетнемерзлые породы.

Биорекультивационные работы проводили в Пуровском и Надымском районах ЯНАО, Сургутском районе ХМАО, где разливы нефти расположены на труднодоступных верховых олиготрофных болотах и в пойменных участках рек. Обследования участков с забором проб с целью хроматографического анализа показали содержание нефтепродуктов до 80,73%.

В настоящее время широкое распространение получают биорекультивационные мероприятия с мягкими щадящими технологиями, не разрушающими активный биопродуцирующий торфогенный слой, исключающие применение тяжелой техники и глубокое фрезерование [1]. Разработанная авторами комплексобеспечивающая эффективную биодеструкцию ная технология, нефти в течение короткого времени в условиях Сибирского Севера, включала применение бактериального препарата и растений-фиторемедиантов. В состав бактериального препарата входили непатогенные штаммы бактерий-деструкторов нефти, адаптированные к пониженным температурам, выделенные из загрязненных грунтов и вод Западной Сибири, являющиеся компонентами эндогенной микробиоты в местах нефтеразлива. Для интенсификации абиотического и биотического окисления нефти проводили рыхление верхних горизонтов почвы и торфа мотокультватором, способствующее улучшению аэрации и разрушению смолисто-асфальтеновой корки.

В местах, подлежащих биоремедиации, преобладающими являлись экосистемы вейниковых и осоковых лугов, кустарничковых тундр в устьях крупных рек, кустарничково-сфанговые, кустарничково-осоково-моховые, осоковопушицево-сфанговые болота, сосново-кустарничково-сфагновые олиготрофные рямы.

Пионерами зарастания нарушенных территорий в местах с уничтоженной аборигенной растительностью являются, наряду с крестовником скученным, трехреберником Хукера, звездчаткой толстолистной, и злаки [2], поэтому в качестве растения для фиторекультивации был выбран песчаный овес. Несмотря на то, что овес не является типичным обитателем олиготрофных болот Сибирских увалов, его корневая система способствует образованию почвенных пор, благодаря которым происходит аэрация. Корни овса также способствуют развитию ризосферной микробиоты, выделяют активные ферменты, активизирующие рост микроорганизмов и разрушение компонентов нефти. Кроме того, овес относится к видам, устойчивым к нефтяному загрязнению. Обильная наземная биомасса растений задерживает почвенные частицы, содержащие гумус, семена других растений, прорастают в следующем сезоне на подготовленном овсом грунте. В последующем из очага начального зарастания, формируемого овсом, в месте полной деградации растительного компонента экосистемы из-за нефтеразлива, начинается постепенное формирование и восстановление типичных фитоценозов болотных экосистем с их представителями (осоки, пушицы, хвощи и др.), и, к тому же, живой напочвенный покров способствует защите от водной и ветровой эрозии.

В результате разлива нефти происходит уменьшение запасов почвенного азота из-за интенсивного роста микроорганизмов, способствующих разложению нефти, как следствие, недостаток азота становится лимитирующим фактором для биодеструкции загрязнителя. Поскольку содержание азота в торфе, почве и насыпных песчаных грунтах северных экосистем итак изначально невелико, то оправданным является искусственное внесение небольшого количества азотсодержащих удобрений, что поддерживает аборигенные и внесенные микроорганизмы-деструкторы и растения, высаженные для фиторемедиации.

Этапы работ по предложенной методике рекультивации с целью снижения содержания нефти до экологически приемлемого уровня включали в себя двух-кратную обработку водной поверхности и болот биопрепаратом (лиофильно высушенными клетками микроорганизмов) в количестве 10 г/га и минеральными удобрениями, посев в начале вегетационного сезона на необводненных участках семян овса для улучшения агрофизических свойств грунта. Всего на территории севера Сибири было очищено более 500 га. Из-за неблагоприятного температурного фактора и короткого репродуктивного периода биодеструкторов и фиторемедиантов некоторые сильно загрязненные нефтью участки (со-
держание нефтепродуктов более 70%) подлежали обработке в последующие 2-3 сезона.

Таким образом, предложенная технология является экологически приемлемой, не оказывает отрицательного влияния на эволюционно сложившиеся болотные экосистемы, не разрушает продуктивный торфогенный слой, повышает деструкционный потенциал за счет штаммов-утилизаторов нефти, выделенных непосредственно в нефтезагрязненных экосистемах Сибири (т.е. не являющихся чужеродными). В процессе биоремедиации происходит повышение биогенности грунта за счет внесенных удобрений и микроорганизмов, что способствует в дальнейшем активизации природных резервов экосистемы – увеличению численности аборигенной нефтеутилизирующей микробиоты и росту растений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лопатин К.И., Толстограй В.И., Женихов Ю.Н. и др. Альтернативная технология рекультивации нефтезагрязненных торфяных болот. / Вестник Нижневартовского гос. ун-та. – 2009. – № 1, С. 58-61.

2. Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. – Новосибирск: Наука. – 1998.

© Е. К. Емельянова, А. Ю. Алексеев, А. М. Шестопалов, В. А. Забелин, 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ

Виктор Прокопьевич Ефимов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, тел. (383)335-96-54, e-mail: efimov-pedan@mail.ru

Испытания цельных и надрезанных образцов долерита и габбро-диорита, проведенные при разных скоростях нагружения, позволили вычислить кинетические параметры данных сред в модели разрушения С. Н. Журкова. Показано, что начальная энергия активации разрушения в одинакова в обоих случаях, как при нелокализованном так и при локализованном разрушении.

Ключевые слова: изгиб, долговечность, прочность, трещиностойкость, скорость нагружения, энергия активации разрушения.

FRACTURE TOUGHNESS VERSUS LOADING RATE IN ROCKS

Victor P. Efimov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Phys-Math, tel. (383)335-96-54, e-mail: efimov-pedan@mail.ru

Testing of massive and cut dolerite and gabbro-dolerite specimens under varied loading rates allowed calculating kinetic parameters of these rocks in the framework of the Zhurkov model of fracture. The author shows that initial energy of fracture activation is the same in the both cases, either in nonlocalized or localized failure.

Key words: bending, durability, strength, fracture toughness, loading rate, fracture activation energy.

Процесс разрушения образца или изделия может быть разбит на несколько стадий. Разбиение процесса разрушения на стадии, каждая из которых занимает свою долю в долговечности, помогает исследователю сосредоточиться и выделить определенные закономерности в разрушении, хотя и носит условный характер. Автор данной работы процесс разрушения предлагает разбивать на две фазы: разрушение сплошного образца и надтреснутого. Сделать такое разбиение имеет смысл, потому что современное феноменологическое описание разрушения этих двух этапов не проводится в рамках единого подхода. Если процесс разрушения сплошного образца при неизменной температуре носит нелокализованный характер и контролируется действующим напряжением [1], то процесс развития трещины (разрушение надтреснутого образца) является крайне локализованным и контролируется наряженным состоянием возле вершины трещины, которое принято характеризовать коэффициентом интенсивности напряжений в вершине трещины [2, 3]. Обе стадии разрушения могут быть описаны в рамках кинетической концепции прочности С.Н. Журкова [4]. Для использования этой хорошо развитой модели разрушения, основанной на накоплении повреждений перед проявлением последней стадии разрушения – разделением тела на части, следует определить физические параметры исследуемых сред, входящие в кинетическое уравнение долговечности Журкова. В [5], ориентируясь на горные породы, был предложен метод определения этих параметров: начальной энергии активации разрушения U_0 , и структурно чувствительного параметра пропорциональности γ , основанный на регистрации зависимости прочности образцов горной породы от скорости нагружения. По сути, этим способом определяются кинетические параметры нелокализованного разрушения. Для определения параметров локализованного разрушения следует обратиться к кинетике магистральных трещин. Придерживаясь кинетической термофлуктуационной модели разрушения для скорости распространения трещины в [1] предложена следующая формула:

$$\overset{\bullet}{L}_{\rm Tp} = \overset{\bullet}{L}_0 \exp\left(-\frac{U_0^{\prime} - \gamma^{\prime}\sigma}{RT}\right), \tag{1}$$

где U'_0 – начальная энергия активации процесса разрушения, γ' – структурная постоянная, характерная для данного материала и условий испытаний, σ – постоянное напряжение, приложенное к образцу, T – абсолютная температура, \dot{L}_0 – коэффициент размерности скорости. Эта формула была доказана в результате большого количества экспериментов на образцах из полимерных пленок. Следует отметить существенный момент, длина трещины, подчиняющаяся (1) и отвечающая докритическому росту, составляла доли миллиметра. В таком случае процесс развития трещины контролировало напряжение возле её вершины. Асимптотика, присущая магистральной трещине, и пропорциональная коэффициенту интенсивности напряжений K_I , еще не сформировалась. Само напряжение возле вершины трещины пропорционально приложенному внешнему напряжению σ .

Для магистральной трещины отрыва в докритическом режиме, запишем (1) в следующем виде:

$$\overset{\bullet}{L}_{\rm Tp} = \overset{\bullet}{L}_0 \exp\left(-\frac{U_0^{\prime} - \xi K_1}{RT}\right) = V \exp(\upsilon K_1),$$
 (2)

где характеристикой локального поля напряжений в вершине трещины служит коэффициент интенсивности напряжений K_I [2], а вместо структурно чувствительного коэффициента γ , введен коэффициент пропорциональности ξ .

Для определения начальной энергии разрушения U_0 в такой постановке необходимо знание коэффициента \dot{L}_0 , значение которого оценить крайне сложно, потому что оно соответствует асимптотическому значению при $T \to \infty$. По этой причине следует искать другие способы получения экспериментальной информации о разрушения при наличии трещины, которые позволяют характе-

ризовать этот процесс не в терминах скорости его развития, а в терминах времени накопления повреждений в локализованном поле напряжений, присущем трещине. Эксперименты на трещиностойкость, проведенные при разных скоростях нагружения, являясь аналогом испытаний цельных образцов на прочность в зависимости от нагружения, решают эту проблему. Для обоснования данного подхода разобьем долговечность образца с магистральной трещиной на два этапа [2]: инкубационный период и период развития трещины до критического размера, вклад в долговечность времени распространения трещины после критической фазы пренебрежимо мал для неустойчивых схем нагружения. Стандартное испытание на трещиностойкость проводится в режиме постоянной скорости нагружения, и при таком испытании время развития трещины до критического размера также становится малым, по сравнению с инкубационным периодом. Поэтому для времени до старта неустойчивой трещины мы можем воспользоваться уравнением долговечности Журкова и записать его при постоянном значении нагрузки в виде:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0^{\prime} - \eta K_1}{RT}\right) = B \exp(\beta K_1), \qquad (3)$$

 τ_0 – период тепловых колебаний, а U'_0 и η – константы материала. Для режима постоянной скорости нагружения, воспользовавшись формализмом, описанным в [1], имеем следующее уравнение, связывающее величину критического коэффициента интенсивности напряжений со скоростью нагружения:

$$K_{1c} = \frac{\ln \beta B}{\beta} + \frac{1}{\beta} \ln K, \qquad (4)$$

где параметры β и *B* те же, что и в (3).

Влияния скорости нагружения на величину трещиностойкости горных пород было изучено на образцах долерита и габбро-диорита в виде балочек размером 120х20х19 мм, имеющих посредине разрез длиной 5-7 мм, имитирующий трещину. Образцы были испытаны на трехточечный изгиб при различной скорости нагружения. Пропил был нанесен алмазным диском толщиной 1 мм. Как показано в [6], такой пропил в образцах горных пород эффективно имитирует трещину, и для определения трещиностойкости не требуется заканчивать его реальной трещиной, проращенной каким-либо способом. Это связано с первоначально дефектной структурой горных пород. Обработка результатов экспериментов была проведена по формуле для испытаний на трехточечный изгиб [7]:

$$K_{1} = \frac{6Ma^{1/2}}{Wt^{2}} \left(1,96 - 2,75a/t + 13.66(a/t)^{2} - 23,98(a/t)^{3} + 25,22(a/t)^{4} \right),$$

где *М* – изгибающий момент, *W*, *t* – ширина и толщина образца соответственно, *a* – длина пропила. Величина критического коэффициента интенсивности напряжений определялась по максимальному значению нагрузки перед разрушением и длине первоначального разреза. Результаты испытаний представлены на рис. 1 в виде значений коэффициента интенсивности напряжений, определенных из экспериментальных данных. Как видно из рисунка для исследованных пород данные испытаний хорошо аппроксимируются прямыми линиями. По параметрам аппроксимирующих прямых, рис. 1, используя формулу (4), определяли параметры β и *B*, которые связаны с кинетическими постоянными изученных пород, входящими в уравнения долговечности: начальной энергией активации разрушения U_0 и коэффициентом пропорциональности η . Вычисленные значения начальной энергии активации разрушения и коэффициента пропорциональности приведены в таблице.



Рис. 1. Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений долерита для трещин отрыва в зависимости от скорости нагружения: 1 – долерит, 2 – габбро–диорит

Таблица

Кинетические параметры разрушения горных пород, полученные при испытаниях на прочность и трещиностойкость

	Испытания на прочность			Испытания на трещиностойкость		
Горные породы	U ₀ ^{изг} , Дж	$rac{\gamma^{u_{3}r}}{RT}$,	$rac{\gamma^{u_{32}}\sigma_{u_{32}}}{RT}$	$U_0^{\text{тр}}, \frac{\mathcal{Д}\mathcal{H}}{\mathcal{M}O\mathcal{J}\mathcal{b}}$	$\frac{\eta}{RT}$,	$\frac{\eta K_{1c}}{RT}$
долерит	$M_{MO}^{141},6$	0,177	26,26	142,7	$\frac{14,66}{14,66}$	29,3
габбро-диорит	148,9	M,513.3	31,89	148	M11aM,5	31,49

Для сравнения там же приведены результаты определения постоянных кинетического уравнения долговечности, определенных из испытаний этих же пород на прочность изгибом [5]. Структурный параметр γ и введенный параметр пропорциональности η в формуле (3) имеют разную размерность, и их сравнение следует проводить в безразмерном виде.

Проще всего говорить о величинах $\gamma \sigma_{e} / RT$ и $\eta K_{1c} / RT$, в которые входят обсуждаемые параметры, а величины σ_{e} и K_{1c} – временная прочность на растяжение и критический коэффициент интенсивности напряжений, измеренные по стандарту (при регламентированной скорости нагружения).

Таким образом, испытания горных пород на трещиностойкость в зависимости от скорости нагружения на образцах, имеющих тонкий пропил на ¹/₄ толщины образца, позволили определить кинетические постоянные в концепции Журкова С.Н. для исследованных горных пород на этапе локализованного разрушения. Сравнение этих констант для локализованного и нелокализованного разрушения позволяет сделать вывод об одинаковой величине начальной энергии разрушения в обоих случаях. Структурно чувствительный параметр γ и параметр пропорциональности η , измеряемые в разных единицах, могут быть сравнимы в безразмерном виде, и как следует из таблицы, они имеют близкие значения. Приведенное сравнение кинетических постоянных говорит о том, что процессы нелокализованного и крайне локализованного разрушения имеют одни и те же характеристики разрушения в кинетической модели прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. // М.: Наука – 1974.

2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. // М.: Наука. – 1974.

3. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. // М.: Наука. – 1985.

4. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел. // Вестник АН СССР. – 1968. – №3, С. 46-52.

5. Ефимов В.П. Исследование длительной прочности горных пород в режиме постоянной скорости нагружения. // ФТПРПИ. – 2007. – №6, С. 37-44.

6. Ouchterlony F. Fracture toughness of rock. - Svedefo Report DS, Stocholm, Sweden, - 1982.

7. Джон Е. Сроули. Вязкость разрушения при плоской деформации. – М.: Машиностроение. – 1977. – Т. 4, С.47-67.

© В. П. Ефимов, 2015

К ВОПРОСУ ПРОГРАММНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СКВАЖИННЫМ МНОГОКАНАЛЬНЫМ ДЕФОРМОМЕТРОМ

Дмитрий Васильевич Барышников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)217-05-15, e-mail: d-baryshnikov@yandex.ru

Владислав Генрихович Качальский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)217-05-15, e-mail: kwg@ngs.ru

Исследуется возможность применения метода программной компенсации температурных воздействий на измерительную систему регистрации малых перемещений многоканальным скважинным деформометром при исследовании напряженно деформированного состояния массивов горных пород и искусственных сооружений методом параллельных скважин.

Ключевые слова: многоканальный деформометр, температурный дрейф, квазилинейная составляющая, измерительная система тензодатчик, температурная компенсация.

FOR QUESTIONS SOFTWARE TEMPERATURE COMPENSATION OF THE RESULT OF THE MEASUREMENT OF SMALL DISPLACEMENTS WELLS MULTICHANNEL DEFORMOMETER

Dmitriy V. Barishnikov

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)217-05-15, e-mail: d-baryshnikov@yandex.ru

Vladislav G. Kachalsky

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)217-05-15, e-mail: kwg@ngs.ru

The possibility of using the software temperature compensation of the measuring system for the registration of small displacement downhole multi deformometer in the study of stress-strain state of rocks and structures the method of parallel wells.

Key words: multichannel deformometer, temperature drift, quasi-linear component of the measuring system strain sensor, temperature compensation.

Исследования напряжений на основе натурных экспериментов, обеспечивающие получение 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. Достоверность информации о величинах действующих напряжений в массиве и элементах конструкции определяет надежность оценок безопасного состояния инженерных сооружений.

Процесс натурного определения напряженного состояния массива горных пород методом параллельных скважин, состоящий из последовательности опытов на объекте, а также технические и программные средства, разработаны в ИГД СО РАН [1–5]. Процедура проведения натурных исследований данным методом, определяющая повышенные требования к аппаратурной и программной реализации имеет следующие особенности:

• продолжительность измерения деформаций стенок измерительной скважины может достигать, как правило, не мене 2-х часов;

• температура окружающей среды и массива горных пород могут значительно отличаться;

• процесс бурения параллельной возмущающей скважины сопровождается принудительным охлаждением массива низкотемпературной водой;

• при измерении напряжений в нескольких точках от устья измерительной скважины необходимы перемещения деформометра и стабилизация показаний измерительных устройств в новом положении.

Указанные выше особенности определяют специальные требования к программно-техническому обеспечению эксперимента. В [7] достаточно подробно описаны техническая структура аппаратуры и математический подход к коррекции результатов эксперимента. Необходимость коррекции определяется как особенностями процедуры данного эксперимента, так и возможными нештатными ситуациями, а именно возможным попаданием охлаждающей жидкости в измерительную скважину и её воздействием на деформометр. В зависимости от места проникновения жидкости эксперимент либо останавливается, либо требует коррекции полученных результатов.

Рассмотрим процедуру программно - математической коррекции данных на примере проведённых экспериментов в бетоне на промышленном объекте. На рис. 1. показаны графики "время - смещение", полученные на основе некорректированных данных процесса деформации стенок скважины, снятых с помощью 4-х компонентного деформометра. На графике видно, что показания измерительной часть комплекса по всем измерительным парам, обусловленные температурным дрейфом увеличиваются по модулю, хотя основные деформации от бурения возмущающей скважины уже закончились на 120 – ой минуте от начала эксперимента.

Выделим линейные составляющие (1) дрейфа в соответствии с уравнением (2) из [6]:

$$y_{out,1}[j] = -A_{1}x[j] + y_{1}[j]$$

$$y_{out,2}[j] = -A_{2}x[j] + y_{2}[j]$$

$$y_{out,k}[j] = -A_{k}x[j] + y_{k}[j]$$
(1)

где $y_{\text{out,i}}[j]$ - откорректированные по *i* - му каналу измерения смещений контура измерительной скважины, *i* = 1,2,...*k*;

k – число направлений измерения смещений контура скважины;

j – дискретное время, j = 0, 1,;

А_і – коэффициент квазилинейной функции температурного дрейфа;

x [j] - отсчёты времени работы системы с начала записи дрейфа,

j = 0, 1, 2, ..., N - дискретное время;

N- число отсчётов временных рядов за время измерения дрейфа;

 $y_k[j]$ – отсчеты по i – му каналу измерения смещений контура измерительной скважины.



Рис. 1. Графики измеренных смещений контура скважины до коррекции дрейфа

Для выделения используем отрезки графика на рис. 1 с явно выраженным дрейфом с 120 по 190 минуты процесса эксперимента. Процессы приведены на рис. 2.



Рис. 2. Участки графиков выделенных процессов деформирования и дрейфа с явно выраженным наклоном

Расчет коэффициентов *A_i*, *i* = 1,2,3,4 методом наименьших квадратов приводит к следующей системе уравнений коррекции:

$$y_{1j} = x_{1j} - (0,277*t_j + 15,78);$$

$$y_{2j} = x_{2j} - (0,206*t_j + 7,178);$$

$$y_{3j} = x_{3j} - (0,212*t_j - 2,34);$$

$$y_{4j} = x_{4j} - (0,242*t_j - 0,25),$$

(2)

где y_{ij} – откорректированные значения смещений в момент t_i ;

 x_i – исходные значения смещений от i – ой пары балочек, полученные в результате эксперимента в момент t_j ;

t_j – дискретное значение отсчётов времени.

Полученные коэффициенты наклона A_i {0,277; 0,206; 0,212; 0,242} близки по своим абсолютным значениям, что свидетельствует об одинаковом влиянии температурного дрейфа на все 4 канала измерения.

После коррекции исходных данных с учетом (2) графики показаны на рис. 3.



Рис. 3. Графики смещений контура скважины после квазилинейной коррекцииисходных данных

На рис. 3 практически отсутствует остаточный дрейф, что иллюстрирует успешное применение предложенной процедуры (2) коррекции дрейфа. Справедливость применение линейной коррекции можно обосновать квазилинейной температурной зависимостью показаний тензодатчиков. С ростом или падением температуры изменяется сигнал ненагруженного датчика - дрейф или ошибка нуля. Данная ошибка указывается в процентах диапазона. Если датчик имеет относительную ошибку нуля 0,01%, то абсолютная ошибка при изменении температуры в процессе проведения эксперимента на 20 °C, чувствительности тензодатчика Ks = 2 мB/В и питающем напряжении 10 В будет:

$$\Delta U_t = 0.01\% \text{ Ks/}^{\circ}\text{C} = (2*10)*0.01*20 = 0.04 \text{ MB}.$$
 (3)

Таким образом, сигнал ненагруженного датчика за время эксперимента может измениться на 0,04мВ. При коэффициенте передачи канала измерения ≈1мкм/мкВ вклад дрейфа (3) в основной сигнал может достигать 40мкм. Данный результат имеет максимальное оценочное значение. Как видно из графиков на рис.1 максимальный дрейф не превышает 6-8 мкм, что может быть сравнимо

с изменением полезного сигнала на участках измерений с незначительным уровнем напряжений.

Рассмотрим влияние коррекции дрейфа на результаты вычисления напряжений для исходных данных (рис. 4a) и откорректированных (рис. 4б).



Рис. 4. Результаты расчета величин напряжений в бетонном массиве: а - по исходным данным; б - по откорректированным данным (рис. 3)

Сравнение результатов оценок среднеквадратичных ошибок компонентов напряжений (строка DZETA) показывает, что применение коррекции дрейфа к экспериментальным данным значительно уменьшает ошибки определения и позволяет получить более точные оценки величин напряжений. Рассмотренный пример программной компенсации температурного дрейфа показаний измерительной системы при проведении экспериментов методом параллельных скважин, даёт возможность повысить точность натурного определения действующих величин напряжений в массиве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Барышников В.Д., Бобров Г.Ф., Попов С.Н., Федоренко В.К. 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. / Тр. конференции «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. Программно-техническое обеспечение экспериментальных исследований НДС массива горных пород методом параллельных скважин // Труды Х междунар. научной конференции «ГЕО-Сибирь-2014». Новосибирск: СГГА. – 2014.– № 4. С.109-114.

© Д. В. Барышников, В. Г. Качальский, 2015

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УГЛЕМЕТАНОВЫХ ПЛАСТАХ

Татьяна Анатольевна Киряева

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

Приведены результаты стендовых исследований по изучению изменения температуры газонасыщенного угля при повышении давления нагружения, а также с целью определения структурных и физико-механических свойств газонасыщенного угля.

Ключевые слова: углеметановые геоматериалы, выход летучих веществ, температура угля, спекл-фотографии, структура горных пород.

MODELING THERMODYNAMIC PROCESSES IN METHANE-BEARING COAL

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The author describes the bench test data on the temperature change in gas-saturated coal under increased load pressure aimed at assessment of structural and physico-mechanical properties of high methane coal.

Key words: methane-containing material, volatile content, coal temperature, speckle-photography, rock structure.

В последнее время рядом российских ученых были проведены исследования по определению изменения температуры в процессе отработки угольных пластов. При рассмотрении различных взглядов на формирование механизма повышения температуры углеметанового массива можно говорить о том, что во всех работах говорится об установлении высоких температур в зонах опасных по выбросам газа и угля. Отмечено, что в зонах повышенного горного давления происходит изменение температуры в сторону возрастания.

Таким образом, дальнейшие исследования по изменению температуры угольного пласта в призабойной части могут дать ответ на ряд вопросов связанных с газодинамическими процессами при отработке угольных пластов, вплоть до внезапных выбросов угля и газа.

Поэтому необходимо исследование влияния температуры, напряженнодеформированного состояния и физико-химических свойств газоносных угольных пластов на их выбросоопасность.

Исследованиями свойств углеметановых пластов российскими учеными установлен факт состояния метана [1, 2], при котором значительная его часть заключена в составе твердого раствора с углем, вторая часть связана с ним силами сорбции и очень небольшое количество представлено свободным газом. Процесс распада углеметана на уголь и метан протекает с выделением энергии, что приводит не только к динамическому разрушению угля, но и выносу его значительной части в горную выработку потоком выделяющегося газа. Поэтому разработка модели геомеханического состояния углепородного массива, в которой роль метана является одной из основных, существенно расширит возможности управления следствиями технологических решений по угледобыче и обеспечения предварительной дегазацию месторождений. Такая модель геомеханического состояния является новой. В ее рамках необходимо решить фундаментальную задачу – установление особенностей разрушения газоносного массива при динамически развивающемся опорном давлении и установление условий развития геомеханических и газодинамических процессов до критического состояния, вызывающего горные удары и внезапные выбросы угля и метана. Решение этой задачи требует создания соответствующего методического, алгоритмического и программного обеспечения, реализующего модель и осуществляющее комплексное проведение исследований.

Для решения поставленной задачи необходимо создание комплексной измерительной системы детального дистанционного контроля изменений температуры и напряженно-деформированного состояния образцов горных пород в процессе их нагружения.

Актуальность создания такой системы диктуется необходимостью адекватного физического моделирования термодинамических процессов в углеметановых пластах по мере роста температуры и горного давления с увеличением глубины освоения угольных месторождений.

Инфракрасная термография, основанная на зависимости мощности инфракрасного излучения с поверхности контролируемого тела от его температуры, открывает новые возможности для исследования особенностей изменения температурных полей наблюдаемых физических объектов. Современные компьютеризированные тепловизоры позволяют хранить и обрабатывать большие массивы данных после проведения записи меняющихся во времени температурных полей объектов для их оперативного анализа с помощью сложных и более точных математических моделей.

При адиабатическом деформировании заданного элемента упругого тела приращение ($\Delta \Pi$) первого инварианта тензора напряжений вызывает приращение его температуры (ΔT):

$$\Delta T = A_m T_0 \Delta \Pi \,, \tag{1}$$

где $A_m = \alpha / (\rho C)$, α – коэффициент линейного расширения, C – удельная теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность материала; T_0 – начальная температура.

Следовательно, измеряя ΔT , можно определять $\Delta \Pi$ – получать информацию об изменении напряженного состояния контролируемого элемента твердого тела во времени.

Создан стенд, оснащенный комплексной измерительной системой дистанционного контроля изменений температуры и напряженно-деформированного состояния угольных образцов в процессе их нагружения до разрушения (рис. 1).



Рис. 1. Схема экспериментально-измерительной установки: 1 — угольный образец; 2— гранитные пластинки; 3 — подвижная траверса; 4 — тепловизор; 5 — комплекс ALMEC-tv

В лабораторных экспериментах использовался компьютерный тепловизор ТКВр – ИФП "СВИТ", разработанный и изготовленный в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, который предназначен для исследований в реальном масштабе времени. Испытания механических свойств образцов угольного керна проводились в ЦКП ИГД СО РАН на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802. Для регистрации микродеформаций использоваанализа цифровых лась автоматизированная система спекл-фотографий ALMEC-tv. Для угля в дополнение к записи диаграммы макродеформации в процессе нагружения образца производилась запись теплового изображения образца угля и оптическая обработка спекл-фотографий. Принцип работы комплекса основан на интерпретации оптических изображений микрорельефа поверхности нагружаемого объекта. Поверхность последнего освещается разведенным пучком когерентного излучения для получения спекл-картины. Спеклы "привязаны" к соответствующим точкам поверхности и при деформации меняют положение вместе с ними. Видеокамера фиксирует эти смещения в режиме покадровой съемки. Комплекс регистрирует параметры процесса в реальном времени с частотой до 27 кадров в секунду при пространственном разрешении не хуже 1 мкм. После программной обработки на выходе получают координаты и величину смещений точек поверхности образца с временной привязкой, что позволяет вычислять компоненты тензора деформаций.

В выполненных экспериментах были одновременно измерены термограммы и соответствующие им спеклы для 18 образцов трех шахтопластов Кузбасса с различными физико-химическими свойствами (газоносность $13-20 \text{ м}^3/\text{т}$, выход летучих веществ 20-36 %, глубина залегания пластов 200-600 м).

Измерения температуры со временем нагружения проводились по всей поверхности угольных образцов, которые сверху и снизу были изолированы от металлической траверсы пресса пластинами из гранита, т.к. коэффициенты теплопроводностей гранита и угля соизмеримы. Образцы угля сжимали со скоростью движения захвата 0.2 мм/мин.

На рис. 2 приведены тепловое изображение (а) образца угля и соответствующие термограммы (б), полученные с использованием программы тепловизора для усредненного значения поведения температуры от времени нагружения в различных точках по вертикальной оси образца. Высота образца угля 4 см, в 2 раза больше толщины гранитной прослойки. Точки A и G соответствуют граниту, D, E, F – центральной части угольного образца. На рисунке хорошо видно увеличение температуры от границ испытуемого образца к его центру (см. светлое пятно вокруг точки E перед видимым разрушением образца в момент времени 240 с).

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о том, что деформирование образца угля является практически адиабатическим и не зависит от его размеров. Для образцов с различными физико-химическими свойствами время до разрушения различно, но практически не зависит от объема образца. При возрастании времени до разрушения образцов угля градиент температуры увеличивается. Это также свидетельствует об адиабатичности процессов в угле.

На рис. 3 представлена трехмерная диаграмма температуры угля и гранита в начале нагружения и перед разрушением испытуемого угольного образца.

В проведенном эксперименте при возрастании уровня нагружения образцов угля вариации температуры и интенсивности ИК-излучения также увеличивались (рис. 4).

Впервые была получена зависимость приращения температуры от выхода летучих веществ образцов угля (рис. 5). Отсюда следует принципиально новый вывод о том, что углеметановые пласты средней стадии метаморфизма при прочих равных геомеханических условиях, связанных с возрастанием уровня горного давления будут нагреваться быстрее, чем, например, бурые: их температурный градиент по уровню напряжения оказывается до 7 раз больше (!).

С учетом данных работы [3] о зависимости предельной внутренней энергии релаксации и диапазонами глубин выбросоопасности углей Кузбасса [удельные значения которой могут служить показателем потенциальной способности геоматериала определенной прочности к образованию дополнительной поверхности (деструкции)], то можно отметить следующие важные моменты.



Рис. 2. Тепловое изображение в момент времени 240 с (а) и термограммы (б) в зависимости от времени нагружения угольного образца (D, E, F) высотой 4 см и гранита (A, B, C, I, H, G)



Рис. 3. Трехмерные диаграммы распределения температуры угля и гранита: а – в начале нагружения; б – перед разрушением испытуемого образца



Рис. 4. Приращения температуры для образцов угля в диапазонах их нагружения до разрушения



Рис. 5. Зависимость приращения температуры от выхода летучих веществ V^{daf} образцов угля (Т-тощий, ОС-отощенный спекающийся, К-коксовый, Ж-жирный)

Предельная внутренняя энергия релаксации метаноносности углей Кузбасса количественно характеризует состояние системы углеметана при переходе его из одного метастабильного состояния в другое при изменении метаноносности в два раза. Отмеченные выше эксперименты показали, что при возрастании уровня нагружения образцов угля приращение температуры увеличивается. Но при этом происходит увеличение и предельной внутренней энергии релаксации метаноносности (рис. 6), т. е. углеметановая система переходит в термодинамически более возбужденное геомеханическое состояние. С учетом данных [4] о наличии бифуркации параметров сорбционной метаноемкости согласно рис. 7 и 8, становится очевидным вывод о том, что максимальному «энергетическому потенциалу» пластов соответствует крайняя неустойчивость сорбционного потенциала углей. При ведении горных работ углеметановый пласт генетически способен сформировать возмущающий импульс, достаточный для развития саморазрушения. При этом максимальные значения внутренней энергии релаксации и приращение температуры соответствуют интервалу выхода летучих веществ 18-22% (рис. 5, 8).



Рис. 6. Приращения температуры для образцов угля при увеличении предельной внутренней энергии релаксации метаноносности

Так, для графика, приведенного на рис. 6, внутренняя энергия релаксации рассчитывалась для напряжений на прессе, достигающих при разрушении угольных образцов в эксперименте 50 МПа. Это соответствует глубине добычи угля около 2 км. Реальные глубины добычи угля в Кузбассе и соответствующая им внутренняя энергия релаксации [4] приведены на рис. 8.

Результаты исследований также хорошо согласуются с выводами работы [5] о том, что приращение тензора напряжений прямо пропорционально приращению температуры для образцов угля с различными физико-химическими свойствами. В работе [3] было показано, что при $\Delta \Pi = 40$ МПа в "идеально упругом" образце угля приращения температуры должны составлять $\Delta T = 0.003$ К. В наших экспериментах на углеметановых образцах это приращение на два порядка больше (около 0.3 К), что можно также объяснить развитием нелинейных деформационно-волновых процессов на микроструктурном уровне внутри образцов, ранее не учитываемых.



Рис. 7. Изменения показателей сорбционной метаноемкости углей Кузбасса и выбросоопасность пластов при подземной разработке месторождений [4]



Рис. 8. Изменение предельных значений внутренней энергии релаксации для углей Кузбасса [4]:

1-4 - подсерии: 1 - верхнебалахонская; 2 - нижнебалахонская; 3 - ильинская; 4 - ерунаковская

Таким образом, по изменению температуры образца угля при его нагружении можно количественно оценивать изменение его напряженно-деформированного состояния. Более того, как оказывается, при нагружении образца в процессе его деформирования происходит выделение добавочной кинетической энергии, что согласуется с введением в [6] понятия "геомеханическая температура". Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00673) и проекта ОНЗ РАН-3.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.Д., Айруни А.Т., Зверев И.В. и др. Свойства органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов // Диплом № 9 на научное открытие, РАЕН, 1994.

2. Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы угольных пластов. – М.: ИАГН, 2000. – 519с.

3. Опарин В.Н., Киряева Т.А., Гаврилов В.Ю., Шутилов Р.А., Ковчавцев А.П., Танайно А.С., Ефимов В.П., Астраханцев И.Е., Гренев И.В. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса. // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. – С. 3-30.

4. Киряева Т. А. Разработка метода газодинамической активности угольных пластов по геолого-разведочным данным на примере Кузбасса. - Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011.

5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: ГИФМЛ, 1965.

6. Опарин В.Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» / Тр. 2-й Росссийско-Китайской конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2012.

© Т. А. Киряева, 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА УГЛЕМЕТАНОВЫХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ПИРОЛИЗА КАМЕННОГО УГЛЯ

Татьяна Анатольевна Киряева

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

Приведены результаты исследований состава газообразных продуктов углеметановых геоматериалов и их материального баланса с помощью СВЧ-пиролиза.

Ключевые слова: углеметановые геоматериалы, выход летучих веществ, СВЧ-пиролиз, состав газообразных продуктов.

ANALYSIS OF COAL-AND-METHANE GEOMATERIAL COMPOSITION USING MICROWAVE-ASSISTED PYROLYSIS OF BLACK COAL

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Doctoral Candidate, tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The paper reports research findings on composition and balance of gaseous components of coal-and-methane materials obtained using microwave-assisted pyrolysis.

Key words: coal-and-methane geomaterials, volatile content, microwave-assisted pyrolysis, gaseous product composition.

Несмотря на достаточно большой опыт разработки угольных пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, проблема внезапных выбросов стоит в ряду наиболее актуальных в социальном, экономическом и научно- технических аспектах. Одна из главных задач этой проблемы – выявление природы и механизма внезапных выбросов угля и газа. Взрыву метана, по предположениям проф. Х.А. Исхакова [1] и к.т.н. С.А. Калякина [2], предшествует скрытая активизация газообразных компонентов, приводящая их в возбужденное состояние благодаря сорбции на поверхности углей и минеральных компонентов. В этих статьях приводятся химические реакции, протекающие в угольном веществе при его механоактивации. При этом возникает «активное» угольное вещество, способное самопроизвольно разлагаться и воспламеняться.

Для количественного содержания жидких, газообразных и твердых фаз, их качественного состава в продуктах пиролиза каменного угля нами выполнено соответствующее исследование с помощью масс-спектрометрии, газовой хроматографии и далее приведены данные для образца угля, отобранного на Чертинском месторождении Кузбасса (глубина залегания пласта 240м, V^{daf}=20%).

СВЧ – пиролиз предварительно высушенных образцов (навеска m=1г.) проводили в инертной атмосфере аргона в кварцевом реакторе с пористым

93

дном. Жидкие продукты собирали в приемник, снабженный газоотводной трубкой. Газообразные продукты пропускали через серию ловушек, после поглощения CO_2 и окисленных соединений серы газы анализировали методом газовой хроматографии на предмет содержании CO, H_2 и углеводородов группы C_1 - C_4 . В ходе экспериментов уровень подводимой CBЧ мощности изменялся ступенчато от 50Вт до 100Вт с шагом 25Вт. Типичная температурная кривая нагрева образца угля представлена на рис. 1.



Рис. 1. Температурная кривая СВЧ – пиролиза образца угля

Выход (масс. %) продуктов пиролиза угля в инертной атмосфере и состав идентифицированных газов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Материальный баланс и состав газообразных продуктов СВЧ-пиролиза образца угля

Обнаружено, что полученный твердый остаток не подвергается озолению в обычных условиях (T=650°C). В отличие от исходного угля наблюдается про-

цесс, напоминающий коксование, при этом образуется рыхлый спекшийся продукт, состоящий преимущественно из углерода.

Состав жидких продуктов представлен в основном нафталином и его производными (рис. 3), а также полиароматическими соединениями. Стоит отметить малое количество серосодержащих соединений (менее 0,5%).



Рис. 3. Материальный баланс, состав газообразных и жидких продуктов СВЧ-пиролиза образца угля

При анализе газов (рис. 4) в режиме реального времени установлено, что СВЧ пиролиз протекает, по меньшей мере, в три стадии.





Первая стадия – низкотемпературная до (450-500°С) и характеризуется низким содержанием водорода, метана и отсутствием СО, что свидетельствует о преобладании процессов газовыделения из исходного сырья над пиролизом. Во время второй стадии (T=600-650°С) процесс пиролиза существенно интенсифицируется, в составе продуктов наблюдаются СО и углеводороды от C₁ до C₄. Последняя стадия (T~800°C) сопровождается образованием в основном синтез-газа.

Таким образом, в результате термического разложения углеметана образуются продукты распада, которые создают с воздухом взрывоопасные смеси. В шахтных условиях мелкодисперсная пыль реакционноспособна по отношению к кислороду. Наличие ацетилена, водорода и др. в продуктах распада угольного вещества и нанопыли снимают вопрос об источниках воспламенения. Становится очевидным, что в определенных условиях горных работ горючие газы, генерируемые углем могут самовоспламеняться, а наночастицы пыли при движении в потоке воздуха – самовозгораться.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00673) и проекта ОНЗ РАН-3.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исхаков Х.А. Активация компонентов взрыва метана путем их сорбции на поверхности угольной пыли. // ТЭК и ресурсы Кузбасса. — 2006. — № 2, С. 55-57.

2. Калякин С.А. Идеология взрывобезопасности угольных шахт, опасных по газу и угольной пыли. // Безопасность Труда в Промышленности. — 2010. — № 11, С. 38-43.

© Т. А. Киряева, 2015

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ПО ОТНОШЕНИЮ К ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА «ГАЗ – ЖИДКОСТЬ» ФОРМ РЕАГЕНТА НА ОБРАЗОВАНИЕ ФЛОТАЦИОННОГО КОНТАКТА

Сергей Александрович Кондратьев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Рассмотрен критерий образования флотационного комплекса «минеральная частица – пузырек» в пенной флотации. Предложен метод количественной оценки собирательной способности десорбируемых форм (ДС-форм) флотационного реагента. Установлено, что основной силой, действующей на жидкость в прослойке, является сила, обусловленная неравномерностью поверхностного натяжения в момент прорыва прослойки, разделяющей объекты взаимодействия, и попаданием ДС-форм на границу раздела «газ-жидкость». Показано, что под флотационной силой ДС-форм закрепившегося на минеральной поверхности реагента следует понимать меру их воздействия на жидкость в прослойке. Указанная сила устраняет кинетическое ограничение образованию флотационного агрегата в виде прослойки жидкости. Численно определена сила ряда карбоновых кислот: насыщенных и ненасыщенных. Установлено, что реагент, обладающий экстремальной величиной флотационной силы, является реагентом с максимальной скоростью утончения жидкой прослойки.

Ключевые слова: флотация, десорбируемые формы флотационного реагента, поверхностное давление, сила реагента.

INFLUENCE EXERTED ON PARTICLE-BUBBLE ATTACHMENT BY FORMS OF REAGENTS SURFACE-ACTIVE RELATIVE TO LIQUID/AIR INTERFACE

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

Under discussion is the criterion for particle–bubble attachment during froth flotation. The author proposes the method for quantitative assessment of collecting ability of desorbable (DS) forms of reagents. It is found that the main force to influence the liquid in the film is the force conditioned by nonuniform surface tension at the moment of rupture of the film between the interaction objects and the fact that DS reagent forms get at the liquid/air interface. The author defines the flotation strength of DS forms of attached reagent as the influence of DS forms on the liquid in the film. The flotation strength eliminates the kinetic particle–bubble attachment constraint represented by the liquid film. The strength of saturated and unsaturated carboxyl acids is calculated. It is revealed that the reagent with the extremal flotation strength is a reagent that induces maximal rate of the liquid film thinning.

Key words: flotation, desorbable reagent forms, surface pressure, reagent strength.

Механизм работы легко десорбируемых с минеральной поверхности форм реагента в образовании флотационного контакта предложен в [1, 2]. Он дает объ-

яснение экстремальной зависимости собирательной активности карбоновых кислот и их мыл от длины углеводородного фрагмента. С увеличением длины углеводородной цепи до 12÷14 происходит рост поверхностного давления карбоновых кислот [3, 4]. В той же последовательности возрастает их флотационная активность. Длина углеводородного радикала реагента, показавшего экстремальную величину поверхностного давления в пленке, соответствует длине углеводородного фрагмента собирателя, имеющего максимальную собирательную способность.

Собирательная активность ненасыщенных карбоновых кислот (олеиновой, линолевой, линоленовой) превышает этот показатель насыщенной стеариновой кислоты. Объясняется это высоким поверхностным давлением пленок их ионномолекулярных ассоциатов на границе раздела «газ-жидкость», превышающем поверхностное давление стеариновой кислоты [4]. Согласно правилу Хукки и Вартиайнена [5] собирательная сила жирных кислот, применяемых при флотации, увеличивается с увеличением ненасыщенности углеводородных цепей. Эксперимент показал, что в указанной последовательности возрастает и поверхностное давление перечисленных кислот.

Флотационные свойства разветвленных карбоновых кислот подчиняются установленному механизму. Сравнение кислот состава $C_{17}H_{35}COOH$ показывает, что разветвленные кислоты отличаются большей флотационной активностью, но значительно меньшей избирательностью [6]. Высокая флотационная активность и снижение качества концентрата объясняются большим поверхностным давлением их пленок.

Выполненный сопоставительный анализ дает возможность предположить, что эффективное удаление жидкости из прослойки выполняет легко десорбируемая с минеральной поверхности форма реагента-собирателя, обладающая активностью по отношению к границе раздела «газ – жидкость».

Целью работы является численная оценка флотационной силы легко десорбируемых с минеральной поверхности форм реагентов-собирателей и сопоставление полученных значений сил с известными экспериментальными и практическими данными по собирательной способности исследуемых реагентов.

Математическая модель работы физически сорбированного реагентасобирателя в элементарном акте флотации. Определим силу, действующую на жидкость со стороны пленки растекающегося реагента. Предположим, что на минеральной поверхности имеется закрепившийся реагент, часть которого представлена легко десорбируемой формой. После локального прорыва прослойки указанная форма сорбции реагента получает доступ к границе раздела «газжидкость», величина поверхностного натяжения которой практически равна поверхностному натяжению воды. При наличии неоднородности поверхностного натяжения возникают поверхностные (капиллярные) силы, действующие тангенциально к свободной поверхности жидкости [7]. Вовлекая в движение поверхность и прилегающие к ней слои жидкости, эти силы генерируют конвективное течение, получившее название конвекции Марангони.

Воспользуемся решением задачи истечения вязкой жидкости из тонкого слоя (прослойки), находящейся на твердой непроницаемой поверхности в при-

ближении «теории смазки» [8]. В рассматриваемой модели физическая форма сорбции реагента может диффундировать вдоль свободной поверхности с постоянной скоростью диффузии D_s , и распространяться за счет конвекции вдоль указанной поверхности. Опуская вывод уравнений, приведем уравнения теории смазки в безразмерном виде

$$h_{t} + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} r h^{2} \sigma_{r}\right)_{r} = \beta \frac{1}{r} \left(\frac{1}{3} r h^{3} h_{r}\right)_{r} - k \frac{1}{r} \left(\frac{1}{3} r h^{3} \left(h_{rr} + \frac{1}{r} h_{r}\right)_{r}\right)_{r}, \tag{1}$$

$$\Gamma_t = \frac{1}{r} (rh\Gamma\sigma_r)_r = \beta \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} rh^2 \Gamma h_r\right)_r - k \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} rh^2 \Gamma \left(h_{rr} + \frac{1}{r}h_r\right)_r\right)_r + \delta \frac{1}{r} (r\Gamma_r)_r, \quad (2)$$

где приняты обозначения для безразмерных параметров $\beta = \frac{\rho H_0^2 g}{s}$, $k = \frac{H_0^2 \sigma_m}{R_0^2 S}$, $\delta = \frac{\mu D_s}{S H_0}$. В уравнении (1) h(r,t) толщина пленки, отнесенная к начальной толщине слоя H_0 . Нижние индексы обозначают дифференцирование по соответствующей переменной. Уравнение (1) получено из уравнений Навье - Стокса в предположении, что $H_0/R_0 \rightarrow 0$. Уравнение (2), связанно с поверхностноактивными веществами, учитывает перенос ПАВ (десорбируемых форм реагента) на межфазной поверхности. $\Gamma(r,t)$ представляет поверхностную концентрацию ПАВ. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации $\sigma(\Gamma)$ определяет уравнение состояния, которое задается в явном виде. При моделировании учтены следующие физические параметры: σ_w , σ_m - поверхностные натяжения чистой жидкости и жидкости с добавлением ПАВ, $S = \sigma_w - \sigma_m$. Время приведено к безразмерному с использованием масштабов

$$r' = R_0 r, \qquad z' = H_0 z, \qquad \sigma' = \sigma_m + S\sigma,$$
$$v'_r = Uv_r = \frac{SH_0}{\mu R_0} v_r, \quad v'_z = \frac{H_0 U}{R_0} v_z, \quad t' = \frac{\mu R_0^2}{SH_0} t, \quad \Gamma' = \Gamma_m \Gamma, \quad p' = \frac{S}{H_0} p_z$$

Система уравнений (1), (2) решается численно с соответствующими начальными и граничными условиями:

На твердой поверхности выполнены граничные условия прилипания и непротекания. На свободной поверхности выполнены кинематическое условие и условие на скачок нормального напряжения.

При r = 0, h(r,t), Γ (r,t) четные функции, следовательно, нечетные производные нулевые

$$(0,t) = \Gamma_r(0,t) = 0, \quad kh_{rrr}(0,t) = 0 \tag{3}$$

При $r \to \infty$ свободная поверхность невозмущенна, концентрация ПАВ нулевая

$$\lim_{x \to \infty} h(r, t) = 1, \ \lim_{n \to \infty} \Gamma(r, t) = 0 \tag{4}$$

Начальные данные предполагают равномерную толщину пленки и постоянную концентрацию в круглом пятне радиуса r = 1:

$$h(r,0) = 1, \ \Gamma(r,0) = \begin{cases} 1 - r^{10}, r \le 1\\ 0, r > 1 \end{cases}$$
(5)

Так же рассматривались другие формы задания начальных данных (аналогичные предложенным в [9]).

Зависимость поверхностного натяжения от концентрации ПАВ. Чаще всего рассматривается линейная зависимость поверхностного натяжения от концентрации [10, 11]

$$\sigma(\Gamma) = 1 - m\Gamma. \tag{6}$$

Borgas and Grotberg [12] использовали уравнение состояния

$$\sigma(\Gamma) = (1 + \eta \Gamma)^{-3}, \quad \eta = 1.08,$$
 (7)

которое применено в настоящей работе.

Результаты расчетов и обсуждение. Расчеты проводились для следующих значений параметров: $\mu = 1.052 \cdot 10^{-3}$, Па·с; $\rho = 10^3$, кг/м³; g = 10.0, м/с²; $D_S = 10^{-8}$, м²/с; $\sigma_w = 72.3 \cdot 10^{-3}$, Н/м; σ_m менялось в зависимости от длины углеводородного фрагмента молекул карбоновых кислот. Значения σ_m оценивались по данным работы [3].

Толщина слоя отнесена к начальной толщине пленки $H_0=4.0\cdot 10^{-8}$ м. Профиль поверхности прослойки h(r,t), поверхностная концентрация реагента $\Gamma(r,t)$, максимальный объемный расход, который вычисляется по формуле $Q = 2\pi r \int_0^H v_r dz$ приведены в таблице для миристиновой, олеиновой, линолевой и линоленовой кислот.

Сила вычислялась по формуле $F = \frac{Q_{max} \cdot r_m}{t_m}$. Здесь Q_{max} максимальное значение расхода, $r_m = 2$ значение радиальной координаты при которой достигается максимальное значение расхода; t_m момент времени соответствующий значению, когда Q_{max} достигается при $r_m = 2$.

Таблица

Давление растекания *S*, толщина прослойки за гребнем волны *H*, сила флотационного реагента *F* и максимальный расход жидкости при r= 0.2·10⁻⁵ m для ряда карбоновых кислот

Параметры	Миристиновая	Олеиновая	Линолевая	Линоленовая		
	кислота	кислота	кислота	кислота		
$S = \sigma - \sigma MH/$						
$\sim \sim \sim m / M$	5,05	6.9	7.9	8.8		
Н [м]	2.622×10 ⁻⁸	2.4105×10 ⁻⁸	2.3221×10 ⁻⁸	2.2507×10 ⁻⁸		
<i>F</i> [H]	2.8006×10 ⁻⁵	4.0682×10 ⁻⁵	4.7015×10 ⁻⁵	5.2774×10 ⁻⁵		
$Q_{\rm max}$ [m ³ /c]	3.1366×10 ⁻¹⁴	4.2363×10 ⁻¹⁴	4.8114×10 ⁻¹⁴	5.3092×10 ⁻¹⁴		
t_m [c]	1.9785×10^{-6}					

Величины поверхностного давления $S = \sigma_0 - \sigma_m$ указанных кислот отличаются на незначительную величину и составляют соответственно: 5,05; 6,9; 7,9; 8,8 мН/м при площади, занимаемой одной молекулой на свободной поверхности 40 Å². Величины сил, действующих на жидкость в прослойке со стороны пленок перечисленных реагентов, составят соответственно: 2,8006×10⁻⁵; 4.0682×10⁻⁵; 4.7015×10⁻⁵; 5.2774×10⁻⁵ Н. В соответствие с величиной сил, действующих на жидкость, изменяется толщина прослойки за гребнем волны: 2.622×10⁻⁸, 2.4105×10⁻⁸, 2.3221×10⁻⁸, 2.2507×10⁻⁸ м.

Полученные значения находятся в качественном соответствии с известными практическими данными и правилом Хукки и Вартиайнена.

Таким образом, предложен метод количественной оценки собирательной способности десорбируемых форм флотационного реагента. Показано, что флотационная сила реагента это мера воздействия его пленки на жидкость в прослойке. Последовательность изменения сил, карбоновых кислот: миристиновой, олеиновой, линолевой, линоленовой совпадает с последовательностью изменения их флотационной активности.

БИБЛИОГРАФИЧСКИЙ СПИСОК

1. Кондратьев С.А. Оценка флотационной активности реагентов-собирателей. / Обогащение руд. – 2010. – № 4. – С. 24 – 30.

2. Кондратьев С. А. Оценка активности и селективности действия карбоновых кислот, используемых в качестве флотационных реагентов. / ФТПРПИ. – 2012. - № 6. – С. 116-125.

3. Поверхностно-активные вещества. Справочник. Под. Ред. Абрамзона А.А., Гаевого Г.М. Л.: Химия, 1979. - С.376.

4. Smith T. Monolayers on water. I. Theoretical equation for the liquid expanded state. / Journal of colloid and interface science. – 1967. –Vol. 23. – P. 27 – 35.

5. Hukki R.T., Vartiainen O. An investigation of the collecting effects of fatty acids in tall oil on oxide minerals, particularly on ilmenite / Mining Engng. -1953 - V. 5 - N. 7 - P. 818 - 820.

6. Алейников Н.А., Никишин Г.И., Огибин Ю.П., Петров А.Д. Флотационные свойства разветвленных карбоновых кислот. // Журнал прикладной химии, 1962. - Т. 35. – № 9. – С. 2078 – 2085.

7. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика, 2-е изд. (М.: ГИФМЛ, 1959) [Translated into English: Levich V.G., Physicochemical Hydrodynamics (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1962).

8. Кондратьев С.А., Мошкин Н.П. Оценка собирательной силы флотационного реагента. // ФТПРПИ. – 2015. - № 1.- С. 137- 144.

9. Peterson E.R., Shearer M. Radial Spreading of Surfactant on a Thin Liquid Film, Appl. Math. Res. Express, 2010, doi:10.1093/amrx/abq015.

10. Jensen O.E., Grotberg J.B. The spreading of heat or soluble surfactant along a thin liquid film. Physics of Fluids. 1992. - N. 5(1). - P. 58-68.

11. Levy R., Shearer M., Witelski T. Gravity-driven thin liquid films with insoluble surfactant: Smooth traveling waves. European Journal of Applied Mathematics. -2008. - N. 18. - N. 6. - P. 679 - 708.

12. Borgas M. Grotberg J. B. Monolayer flow on a thin film. Journal of Fluid Mechanics – 1988. – V. 193. – P.151 – 170.

© С. А. Кондратьев, 2015

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ПО ОТНОШЕНИЮ К ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» ФОРМ КСАНТОГЕНАТОВ В МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ФЛОТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Иван Андреевич Коновалов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)267-42-45, e-mail: Chicago_13@mail.ru

Сергей Александрович Кондратьев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией обогащения полезных ископаемых и техноло-гической экологии, тел. (383)217-07-65, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

Рассмотрен механизм образования контакта минеральной частицы с поверхностью раздела «газ-жидкость» в пенной флотации. В предположении, что основным ограничением образованию флотационного комплекса является прослойка воды между минеральной частицей и пузырьком газа, выполнен поиск форм ксантогенатов способных снять указанное ограничение. Экспериментально показано, что во флотационной пульпе существуют активные по отношению к границе раздела «газ-жидкость» формы ксантогенатов. Указанные формы обладают высокой скоростью растекания по поверхности воды и способны удалить ее из прослойки. Найдено, что с увеличением длины углеводородного радикала ксатогенатов увеличивается скорость растекания пленки активных форм реагента, что коррелирует с увеличением собирательной способности реагента. Также показано, что диксантогенид – аполярное соединение и практически не растекается по поверхности воды.

Ключевые слова: флотация, ксантогенат, фронтальная скорость растекания, прослойка жидкости.

ROLE OF AIR/LIQUID INTERFACE ACTIVE FORMS OF XANTHATE IN THE MECHANISM OF PARTICLE-BUBBLE ATTACHMENT

Ivan A. Konovalov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, tel. (383)267-42-45, e-mail: Chicago_13@mail.ru

Sergey A. Kondratiev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Head of Mineral Processing and Process Ecology Laboratory, tel. (383)217-07-65, e-mail: kondr@misd.nsc.ru

The authors discuss mechanism of mineral particle and air/liquid interface contact in froth flotation. On the hypothesis that the main constraint of particle–bubble attachment is water film between the particle and the bubble, the authors implement the search for forms of xanthate capable to eliminate the constraint. It is experimentally demonstrated that there exist such forms of xanthates that are active relative to air/liquid interface. These forms possess high rate of spreading over water surface and can remove water from the film. It is found that with the longer hydrocarbon radical of xanthate, the rate of spread grows, which is correlated with the increased collecting ability of the reagent. It is shown that dixanthate is apolar compound and does not spread over the water surface.

Key words: flotation, xanthate, frontal rate of spread, liquid film.

В ряде работ показано, что собирательная способность и селективность собирателей зависит от их активности по отношению к границе раздела «газ – жидкость». В [1] установлена зависимость собирательной способности аэрофлотов от их динамической активности по отношению к указанной границе. В [2] аналогичная зависимость установлена для аминов. Количество собирателя на границе раздела «газ-жидкость» зависит от его поверхностной активности, остаточной концентрации (несорбируемая часть) и возможности перехода на указанную границу раздела предварительно сорбированной минеральной поверхностью части собирателя. Эту часть реагента или продуктов его превращения (для ксантогенатов, например, диксантогенид) будем рассматривать, как десорбируемую форму (ДС-форму).

Целью данной работы является поиск активных по отношению к границе раздела «газ-жидкость» форм ксантогенатов. Такие легко десорбируемые с минеральной поверхности формы ксантогенатов, могут оказать эффект удаления жидкости из прослойки, разделяющей частицу и пузырек газа, и характеризовать собирательную способность реагента [3, 4].

Экспериментальная часть:

Во флотационной пульпе находятся катионы металлов, которые при подаче ксантогенатов формируют ксантогенаты металлов, например меди, железа, а также ассоциаты Me(ROCSS)₃⁻, аналогично ассоциатам, сформированным карбоновыми кислотами. В связи с этим выполнялось определение скорости растекания ксантогенатов металлов, и их ассоциатов по поверхности воды. Опыты проводились с этиловым и бутиловым ксантогенатами. Раствор ксантогената готовили перед каждой серией опытов. Окисление 5% растворов этилового и бутилового ксантогенатов осуществлялось 5% раствором йода и пероксидом водорода. Исследовались так же продукты взаимодействия указанных ксантогенатов с растворами сульфатом меди (II) с концентрацией 10 мг Си/мл.

Съемка выполнялась камерой Casio EXILIM EX-F1со скоростью 300 кадров в секунду.

Обсуждение результатов:

Среди продуктов разложения ксантогенатов присутствуют тиосульфат, сульфат, карбонат. Ниже представлены характерные реакции этилового и бутилового ксантогенатов с образованием: перксантогената (1), (2); диксантогенида (3), (4) и ксантогената меди (5), (6), [5, 6].

Окисление перекисью водорода:

$$C_2 H_5 OCS_2 K + H_2 O_2 \to C_2 H_5 OCS_2 OK + H_2 O, \tag{1}$$

$$C_4 H_9 OCS_2 K + H_2 O_2 \to C_4 H_9 OCS_2 OK + H_2 O,$$
 (2)

Окисление ксантогената йодом:

$$2C_2H_5OCS_2K + I_2 \to (C_2H_5OCS_2)_2 + 2KI,$$
(3)

$$2C_4H_9OCS_2K + I_2 \to (C_4H_9OCS_2)_2 + 2KI,$$
(4)

Взаимодействие ксантогената с медным купоросом:

$$2C_2H_5OCS_2K + CuSO_4 \cdot 5H_2O \to (C_2H_5OCS_2)_2Cu + K_2SO_4 + 5H_2O, \quad (5)$$

$$2C_4H_9OCS_2K + CuSO_4 \cdot 5H_2O \to (C_4H_9OCS_2)_2Cu + K_2SO_4 + 5H_2O, \quad (6)$$

Но наиболее важно образование поверхностно – активных ассоциатов $(ROCSS)_3O^-$; $Me(ROCSS)_3^-$, имеющих асимметричное строение молекул, с дипольным моментом большим нуля. Экспериментально была установлена высокая скорость растекания образованных ассоциатов $(ROCSS)_3O^-$ при окислении бутилового ксантогената пероксидом водорода (рис. 1, а) и при взаимодействии с сульфатом меди (II) (рис.1, б) с образованием соединений типа $Me(ROCSS)_3^-$.



Рис. 1. Скорость растекания производных форм бутилового ксантогената на поверхности воды в зависимости от времени. При окислении ксантогената пероксидом водорода – а; при взаимодействии с сульфатом меди(II) - б

Сравнение скоростей растекания производных форм этилового и бутилового ксантогенатов, полученных при взаимодействии с сульфатом меди, показывает, что формы последнего имеют большую скорость растекания по поверхности воды (рис. 2). Следовательно, его десорбируемые, активные по отношению к границе раздела «газ-жидкость» формы оказывают большое влияние на скорость удаления жидкости из прослойки, что находится в соответствии с практикой флотации. Известно, что бутиловый ксантогенат обладает большей собирательной способностью по сравнению с этиловым.



Рис. 2. Скорость движения фронта пленки активных форм ассоциатов этилового и бутилового ксантогенатов на поверхности воды в зависимости от времени

На рис. 3 представлены фотокадры движения фронта пленки ассоциатов, образованных при взаимодействии сульфата меди (II) с этиловым (рис. 3, а) и бутиловым (рис. 3, б) ксантогенатами, наглядно показывающие различие в скоростях перемещения фронтов пленок.



Рис. 3. Растекание ассоциатов этилового – а и бутилового – б ксантогенатов на поверхности воды. Время между кадрами 0,3 с

При мягком окислении ксантогената образуется диксантогендисульфид (диксантогенид). При воздействии мягким окислителем йодом образуются соединения с симметричным строением молекул и дипольным моментом, равным нулю, имеющие малую скорость растекания (рис. 4).



Рис. 4. Растекание диксантогенида на поверхности воды. Время между кадрами 0,3 с. Окисление выполнено йодом

Таким образом, эксперименты по определению скорости растекания по поверхности воды, продуктов окисления этилового и бутилового ксантогенатов пероксидом водорода, йодом и взаимодействия с сульфатом меди, показали, что ксантогенаты могут оказать эффект удаления воды из прослойки и увеличить скорость формирования флотационного контакта. Диксантогенид не активен по отношению к границе раздела «газ-жидкость» и не может оказать существенного влияния на скорость формирования флотационного контакта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Живанков Г.В., Рябой В.И. Собирательные свойства и поверхностная активность высших аэрофлотов. // Обогащение руд, 1985. – № 3. – С. 13 – 16.

2. Bleier A., Goddard E.D., Kulkarni R.D. Adsorption and critical flotation conditions // Journal of colloid and Interface Science. 1977. – Vol. 59. – No. 3. P. 490 – 504.

3. Кондратьев С.А. Оценка флотационной активности реагентов – собирателей // Обогащение руд. – 2010. – № 4. – С. 24 – 30.

4. Кондратьев С.А. Оценка активности и селективности действия карбоновых кислот, используемых в качестве флотационных реагентов. // ФТПРПИ. – 2012. - № 6. – С. 116-125.

5. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Электрохимия сульфидов: Теория и практика флотации. – М.: Наука, 1993. – С. 206.

6. Хан Г.А., Габриелова Л.И., Власова Н.С. Флотационные реагенты и их применение. – М.: Недра, - 1986. - С.271

© И. А. Коновалов, С. А. Кондратьев, 2015

ОБ УЛУЧШЕНИИ НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВЫХ АНКЕРОВ С ГИБКОЙ ТЯГОЙ

Арестакес Арамович Крамаджян

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики, тел. (383)217-01-71, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Евгений Павлович Русин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики, тел. (383)217-07-38, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Станислав Борисович Стажевский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией прикладной геомеханики, тел. (383)217-07-63, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Гил Нам Хан

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики, тел. (383)217-05-78, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Рассматриваются грунтовые анкеры с повышенной несущей способностью, реализуемой за счет натяжения их гибкой тяги под углом к оси установочной скважины. Сила трения, развивающаяся при этом между изогнутым участком анкерной тяги и основанием, увеличивает общее сопротивление конструкции выдергиванию. Натурными и численными экспериментами показано, что нагрузочная характеристика таких анкеров может быть существенно улучшена путем установки в грунтовое основание в области перегиба тяги специальной промежуточной опоры.

Ключевые слова: анкер, грунтовое основание, гибкая анкерная тяга, промежуточная опора, сила трения, несущая способность.

ON IMPROVEMENT OF LOAD-DISPLACEMENT DIAGRAM OF GROUND ANCHORS WITH FLEXIBLE TENDON

Arestakes A. Kramadzhyan

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)217-01-71, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Evgeny P. Rusin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)217-07-38, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Stanislav B. Stazhevsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr. Sc., Head of Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)217-07-63, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Guil Nam Khan

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Laboratory, tel. (383)217-05-78, e-mail: gmmlab@misd.nsc.ru

Ground anchors with flexible tendon are considered, the anchor bearing capacity being increased at the expense of pull force deviation from the anchor installation hole axis. The friction force, developing between the tendon bent portion and the ground base, increases the anchor overall pull-out resistance. Field experiments and digital modeling showed that the load-displacement diagram of the anchor could be significantly improved by means of the placement of a rigid intermediate support in the ground base at the tendon bend area.

Key words: anchor, ground base, anchor flexible tendon, intermediate support, friction force, bearing capacity.

В ИГД СО РАН разработаны грунтовые анкеры с гибкой тягой, в которых, в отличие от традиционных решений [1], повышение несущей способности достигается за счет поворота выдергивающей силы на некоторый угол к оси установочной скважины анкера [2, 3]. При этом тяга изгибается и на контакте между ее изогнутым участком и огибаемой ей опорной областью грунтового основания развивается сила трения, которая существенно увеличивает общее сопротивление конструкции выдергиванию. Анкеры такого типа названы Э-анкерами [3]. Для улучшения их эксплуатационных свойств предложено ввести в конструкцию новый элемент – промежуточную опору (поз. 1 на рис. 1), которая фрикционно взаимодействует с охватывающей ее анкерной тягой 2. Сопротивление такого анкера выдергиванию, как и в предыдущем случае, возрастает за счет реализующейся между тягой и опорой силы трения. Ее величина, согласно формуле Эйлера [4], должна экспоненциально расти с увеличением угла α охвата опоры тягой и коэффициента трения f между ними.

Натурные испытания анкера проводились на площадке полигона «Зеленая горка» ИГД СО РАН (рис. 2). Экспериментальный образец состоял из бетонной промежуточной выполненной в виде полуцилиндра опоры 1 диаметром 300 мм, тяги 2 из стального троса диаметром 10 мм и пяты поворотного [5] типа, выполненной в виде стальной пластины размерами $150 \times 200 \times 10$ мм,. Опыты по его нагружению проводились в соответствии с методикой, отработанной в предыдущих исследованиях [3, 5]. Угол α охвата тягой опоры составлял 70°, коэффициент *f* трения троса по бетону опоры – 0,40.


- Рис. 1. Принципиальная схема Э-анкера с повышенной несущей способностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками:
 - 1 промежуточная опора; 2 гибкая тяга; 3 установочная скважина; 4 заполнитель;
 5 пята анкера; α угол охвата опоры тягой; F₀ сопротивление выдергиванию пяты анкера; F выдергивающая сила



Рис. 2. Вид со стороны опоры (а) и нагрузочного устройства (б) на экспериментальную площадку с установленным Э-анкером в ходе опытов по его нагружению: 1 – опора; 2 – трос; 3 – монтажная скважина анкера; 4 – заполнитель скважины;

5 – элементы нагрузочного устройства

Экспериментально подтверждено, что сопротивление F данного анкера выдергиванию не сводится к сопротивлению F_0 его пяты, а существенно превышает последнее (рис. 3). Значительное превышение F над F_0 наблюдалось во всем диапазоне перемещения u активного конца анкерной тяги (рис. 3, a). Величина коэффициента K эффективности работы Э-анкера, рассчитываемая как F/F_0 , при этом неизменно сохранялась на уровне ~1.6 (рис. 3, δ), что, как и ожидалось, согласуется с результатами расчетов по формуле Эйлера. Опытами установлено, что использование промежуточной опоры позволило на порядок снизить смещение *и* конца анкера при натяжении и, таким образом, существенно увеличить крутизну его нагрузочной характеристики (рис. 4).



Рис. 3. Рост силы F выдергивания и сопротивления F_0 пяты анкера ему в ходе нагружения: F = f(u) -кривая 1 и $F_0 = f(u) -$ кривая 2(a); зависимость $F = f(F_0)(\delta)$



Рис. 4. Нагрузочные характеристики анкера с опорой (1) и без нее (2)

Помимо физических, проделаны и численные эксперименты по нагружению анкера с промежуточной опорой. Расчеты велись в плоской постановке с использованием компьютерной программы DEM2D, реализующей разработанные в ИГД СО РАН модель геосреды [6-8] и версию метода дискретных элементов [9]. Значения K и u, полученные в опытах, проделанных с Э-анкерами в условиях полигона «Зеленая горка» ИГД СО РАН, отличались от найденных численным моделированием не более, чем на 3%.

Таким образом, физические и численные эксперименты показали, что введение промежуточной опоры в конструкцию Э-анкеров позволяет существенно улучшить их нагрузочную характеристику. Достаточно надежные оценки несущей способности Э-анкеров могут быть получены с помощью формулы Эйлера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xanthakos, P.P. Ground Anchors and Anchored Structures. – N.Y: Wiley, John & Sons. – 1991. – P. 686.

2. Патент РФ № 2457293. Способ сооружения грунтового анкера. / Стажевский С.Б., Крамаджян А.А., Русин Е.П., Хан Г.Н. // Опубл. в БИ № 21, 2012.

3. Крамаджян А.А., Русин Е.П., Стажевский С.Б., Хан Г.Н. О повышении несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой. // ФТПРПИ.– 2014.– №6. – С. 96-106.

4. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. -Т. I. – М.: Наука, 1985. – С. 240.

5. Крамаджян А.А., Русин Е.П., Стажевский С.Б., Хан Г.Н. Поворотные анкеры с гибким тяговым элементом: исследования взаимодействия с основанием. // ФТПРПИ.– 2012.– №6. – С. 63-74.

6. Хан Г.Н. Исследование процесса обрушения смерзшейся породы методом дискретных элементов. / Материалы III-ей международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии добычи и переработки полезных ископаемых». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2003. – С. 98 – 103.

7. Хан, Г.Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости. // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т.11. – № 1. – С. 109 – 114.

8. Хан Г.Н. Моделирование методом дискретных элементов динамического разрушения горной породы. // ФТПРПИ. – 2012. – № 1. – С.110 – 117.

9. Cundall P.A. A discrete numerical model for granular assemblies. // Geotechnique. – 1979. – V. 29, no. 1. – P. 47 – 65.

© А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан, 2015

ПРЕСС ДЛЯ БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ И МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рим Асманович Кулагин

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

Олег Римович Кулагин

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

Борис Борисович Сиволап

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, ведущий инженер, тел. (383)335-94-44, e-mail: bor.nsc.ru@mail.ru

Рассмотрено оборудование для брикетирования мелкодисперсных и мелкозернистых материалов. Проведены исследования по определению оптимальной влажности исходного материала для брикетирования, прочности на одноосное сжатие, изменений прочностных свойств при длительном хранении, поглощения влаги при длительном хранении брикетов.

Ключевые слова: пресс, мелкодисперсные и мелкозернистые материалы, утилизация, брикетирование, экология.

PRESS FOR BRIQUETTING FINE-DISPERSED AND FINE-GRAIN MATERIALS

Rim A. Kulagin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Chief Specialist, tel. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Oleg R. Kulagin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Leading Designer, tel. (383)335-94-44, e-mail: kb41@mail.ru

Boris B. Sivolap

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Engineer, tel. (383)335-94-44, e-mail: bor.nsc.ru@mail.ru

Equipment for briquetting finely dispersed and fine-grain materials has been designed. The authors research optimal moisture content of material to be briquetted, uniaxial compression strength, strength change and moisture absorption in case of long term storage of briquettes.

Key words: press, fine dispersion and fine grain materials, waste disposal, briquetting, ecology.

Задача охраны природы от вредного влияния отходов промышленного производства в настоящее время приобретает все большее значение. В связи

с этим возникает необходимость создания технологического цикла разработки полезных ископаемых, который исключает накопление экологически вредных отходов промышленного производства. Создание безотходного производства возможно путем рационального использования существующих отходов и путем совершенствования технологии с целью сокращения их количества и полного предотвращения образования отходов.

Продолжающееся накопление мелкозернистых и мелкодисперсных отходов производства ухудшает экологическую обстановку в районах добычи и переработки.

Рациональная утилизация отходов позволяет наиболее полно использовать добываемое сырье при разработке полезных ископаемых.

Одним из основных направлений решения данной проблемы является брикетирование.

Наиболее сложной задачей является брикетирование мелкодисперсных отходов фракции до 1 мм. В основном это продукты газоочистки металлургических предприятий. В большинстве случаев они являются ценным сырьем, которое можно вовлечь в производство.

В ИГД СО РАН разработана технология брикетирования мелкозернистых и мелкодисперсных отходов производств различных отраслей, что может обеспечить комплексную переработку минерального сырья на основе ресурсои энергосберегающих экологически безопасных технологий.

В процессе разработки технологии были исследованы следующие параметры: метод прессования; влажность исходного материала; прочность на одноосное сжатие; изменение прочностных свойств при длительном хранении; поглощение влаги при длительном хранении.

На основе проведенных исследований был разработан и изготовлен гидравлический пресс статического прессования (рис. 1).



Рис. 1. Пресс брикетный гидравлический ПБГ-400

Исходный материал для брикетирования загружается в бункер. При рабочем ходе пуансон выдает материал в матрицу, где происходит сжатие материала в замкнутом пространстве с расчетным давлением. При достижении расчетного давления движение пуансона прекращается, затвор перемещается, образуя открытое пространство для выталкивания брикета пуансоном. После выталкивания брикета затвор возвращается в исходное положение. Таким образом, цикл брикетирования завершен. Основными характеристиками брикетного пресса следует считать удельное давление прессования, которое может достигать порядка 200 МПа, а так же размеры брикета (табл. 1).

Таблица 1

Техническая характеристика пресса

Показатели	Значение
Размеры брикетов, длина х диаметр, мм	50x50
Производительность расчетная, кг/час *	25
Усилие прессования максимальное, кН	400
Максимальное давление гидросистемы, МПа	20
Мощность привода, кВт	25

Производительность пресса определена по плотности брикетной массы 1,25 г/см³.

При разработке технологии исследовались различные материалы: шламы угольные; отсевы, пыли угольные, антрацита; коксовые и полукоксовые отсевы; отходы хвостов флотации угольной пены алюминиевых заводов; шламы минеральные от газоочистки производства алюминиевых заводов; мелкозернистые и мелкодисперсные отходы металлургических заводов.

Для производства брикетов применялся связующий компонент в виде лигносульфоната технического.

Разработана технология брикетирования бурых углей без связующих. Технология предусматривает предварительную сушку для удаления влаги.

В табл. 2 приводятся значения пределов прочности на одноосное сжатие для некоторых видов сырья.

Таблица 2

Исходное сырье	Диаметр х	Предел прочности
	длина, мм	на одноосное сжатие, МПа.
Шламы, отсевы угольные	50 x 50	$1,9 \div 6,0$
Отсев из полукокса	50 x 50	$1,3 \div 2,6$
Отсев антрацита	50 x 50	0,6 ÷ 2,9
Отходы хвостов флотации угольной пены	50 x 50	$0,6 \div 5,3$
Шлам минеральный газоочистки	50 x 50	0,6 ÷ 5,2
Отсев бурого угля	50 x 50	$0,4 \div 3,2$

Предел прочности на одноосное сжатие

Средний показатель прочности на одноосное сжатие составляет 2,0–3,5 МПа.

Брикеты набирают прочность в течение первых трех-пяти суток при температуре 20^{0} С. В дальнейшем, при длительном хранении в закрытом помещении прочность брикетов меняется незначительно (рис. 2).



Рис. 2. Набор прочности брикетов с момента брикетирования

Оптимальная влажность для брикетирования в замкнутом объеме составляет 8÷12 % (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость прочности брикетов от влажности исходного материала для брикетирования

При естественной сушке брикетов в течение нескольких суток содержание влаги в брикетах стабилизируется, в дальнейшем, при длительном хранении в закрытом помещении содержание влаги в брикетах не изменяется (рис. 4).



Рис. 4. Естественная сушка брикетов

Анализ результатов исследований брикетирования мелкодисперсных и мелкозернистых материалов на прессе ПБГ-400 показывает удовлетворительное качество брикетов. Средняя прочность брикетов на одноосное сжатие (2,0÷3,5 МПа.) позволяет осуществлять транспортировку потребителю на дальнее расстояние. В условиях хранения брикетов в закрытом помещении прочность меняется незначительно, а содержание влаги не меняется. Оптимальная влажность для брикетирования (8÷12%) исходного материала для большинства материалов достигается естественной сушкой в закрытом помещении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Езупова М.Д. Получение бездымного бытового топлива из бурых углей Канско-Ачинского бассейна методом термобрикетирования. / Автореферат дис. канд. технич. наук. – М.: Институт горючих ископаемых. – 1995.

2. Кулагин Р.А., Кулагин О.Р. Подготовки бурого угля для брикетирования без связующих / Сб. тезисов докладов Российско-Казахстанского Симпозиума «Углехимия и экология Кузбасса». – Кемерово: ООО «Фирма ПОЛИГРАФ». – 2014, С. 47.

3. Кулагин Р.А., Кулагин О.Р. Результаты брикетирования мелкозернистых и мелкодисперсных отходов производства / Сб. тезисов докладов Российско-Казахстанского Симпозиума «Углехимия и экология Кузбасса». – Кемерово: ООО «Фирма ПОЛИГРАФ». – 2014, С. 48.

© Р. А. Кулагин, О. Р. Кулагин, Б. Б. Сиволап, 2015

ЭПЮРЫ ОПОРНОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Геннадий Иванович Кулаков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-07, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Рассмотрены особенности опорного горного давления в окрестности очистного забоя в условиях угольного пласта горизонтального залегания. Отмечена связь горного давления с геологическими и физико-механическими параметрами массива. Выполнены исследования напряжений в стенках горных выработок в условиях Алтае-Саянской сейсмической зоны, в частности, с использованием фотоупругих скважинных датчиков типа ФДО-2.

Ключевые слова: угольная шахта, очистной забой, горное давление, эпюры горного давления, фотоупругие датчики, шахтный полярископ.

LINES OF ABUTMENT PRESSURE FROM WORKFACE

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: kulakova.38@yandex.ru

The paper focuses on features of abutment pressure from workface in horizontal coal bed. It is shown that the abutment pressure is connected with geological and physico-mechanical characteristics of rocks. The author analyzes stresses in sidewalls of mine excavations in the Altai-Sayan folded zone, in particular, using photoelastic downhole sensors FDO-2.

Key words: coal mine, workface, abutment pressure, abutment pressure lines, photoelastic sensors, mine polariscope.

Эпюра опорного горного давления является информативным параметром, характеризующим напряженное состояние массива впереди очистного забоя [1,2]. На рис. применительно к пологому угольному пласту или пологой рудной залежи приведен в двух вариантах общий вид эпюры опорного горного давления: а – общая схема очистного забоя при отработке угольного пласта механизированным очистным комплексом и общий вид эпюры опорного горного давления; б – все обозначения забоя, комплекса и эпюры горного давления. Использованы следующие обозначения: 1 – пласт угольный, пологого или горизонтального залегания, 2 – очистной забой, 3 – призабойная зона, 4 – механизированный комплекс, 5 – лавный конвейер, 6 – отработанное пространство, 7 – измерительная скважина для регистрации параметров с использованием аппаратуры, основанной на регистрации электромагнитного фона в очистном забое и измерительной скважине. Аппаратура, используемая для контроля эпюры горного давления, размещается в измерительной скважине либо вблизи её устья, и включает следующие элементы: 8 – антенна скважинная, 9 – штанга, на переднем конце которой установлена антенна, на противоположном конце штанги – регистрирующий прибор 10 типа РЭМИ-2 или ИЭМИ-1. Также обозначены: 11 –дневная поверхность, 12 – собственная эпюра горного давления, 13 – кровля угольного пласта 1, 14 – почва угольного пласта, 15 – положение антенны у дна скважины.

Штанга 9 выполнена диэлектрической. Вдоль штанги проложен коаксиальный кабель, соединяющий антенну и регистрирующий прибор. На штанге нанесена по всей её длине метрическая линейка, состоящая из делений в 20 см, которые содержат сантиметровые и мм деления.



Рис. Эпюры опорного горного давления очистного забоя при отработке механизированным комплексом горизонтально залегающего пласта: по горизонтальной оси – расстояние вдоль скважин, по вертикальной – напряжения (пояснения в тексте)

На рисунках использованы следующие обозначения: к₀ - точка на забое – нижняя точка устья скважины, к₁ - точка максимума эпюры опорного давления, к_а - точка в скважине на её нижней стенке, соответствующая положению максимума опорного давления, к_в - точка пересечения правой ветви эпюры с горизонтальной линией, совмещенной со срединой нижней стенки измерительной скважины и соответствующей напряжению в породе от веса столба породы высотой от линии нижней стенки скважины до дневной поверхности 11, к_в - точка симметричная точке к_в, но расположенная на нижней стороне скважины, f_m вектор максимального опорного давления в пределах рассматриваемой эпюры опорного горного давления, уН - величина вертикальной компоненты напряжений от веса пород в точке, соответствующей нижней стенки скважины, ү плотность пород по вертикальному разрезу, перпендикулярному оси скважины, на расстоянии от поверхности до дна скважины по вертикали, l_a - расстояние от плоскости забоя до вектора f_m , l_6 - расстояние от плоскости забоя до точки κ_{B} , l_8 - расстояние от дна скважины до антенны при снятии отсчета по прибору, l_{пка}-полная длина скважины.

Обычно выделяют три основных параметров эпюры горного давления: - максимум эпюры – напряжение f_m , - расстояние до точки максимума плоскости забоя – параметр l_a , - расстояние вдоль скважины от забоя до точки $\kappa_{\scriptscriptstyle B}$ - параметр $l_{\scriptscriptstyle B}$.

На практике по величине f_m оценивают напряжения в массиве впереди забоя, по величине l_a оценивают размер пластической зоны, по параметру l_B оценивают размер зоны, в пределах которой могут происходить все геодинамические процессы (разрушение угля, породы, горные удары, внезапные выбросы). Эти параметры обычно приводятся в проектах на ведение горных работ.

В настоящее время параметры эпюры опорного горного давления определяют экспериментальным путем при измерениях в горных выработках. Одним из распространенных способов состоит в использовании скважинных кольцевых фотоупругих датчиков [3]. Эксперименты выполняются в следующей последовательности. В подготовительной выработке, расположенной впереди очистного забоя в направлении на встречу забою бурится одна или несколько скважин (или шпуров), в которых устанавливают датчики. Затем по мере подвигания очистного забоя регистрируют показания датчиков. Кольцевой фотоупругий датчик позволяет определить ориентацию квазиглавных напряжений в месте установки датчиков и величину прироста этих напряжений.

Однако в условиях действующего забоя этот способ относительно трудоемкий. Наблюдения надо вести от нескольких дней до недели и более, пока очистной забой не дойдет до места установки датчиков.

Из других геомеханических методов возможно использовать методы полной разгрузки с установкой прибора в центральной скважине. В лаборатории механики горных пород разрабатывается метод оценки параметров эпюры гор-

ного давления на основе регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) в скважинах, пробуренных из очистного забоя [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра. – 1980.

2. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Издво «Горная шахта». – 2006.

3. Кулаков Г.И., Счастливцев Е.Л. Скважинные кольцевые фотоупругие датчики. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН. – 1998.

4. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: «Параллель». – 2008.

© Г. И. Кулаков, 2015

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ СВЯЗНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Самуил Яковлевич Левенсон

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Алексей Васильевич Морозов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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, e-mail: alex02@ngs.ru

Михаил Александрович Ланцевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)220-14-98

Рассмотрены проблемы, связанные с созданием техники для уплотнения дисперсных материалов. Представлены некоторые результаты исследования процесса вибрационного уплотнения связных материалов. Показано влияние режимов вибровоздействия на плотность формуемого материала.

Ключевые слова: эксперимент, связный материал, вибровозбудитель, вибрация, режим вибровоздействия, уплотнение.

FEATURES OF COHERENT MATERIAL COMPACTION IN CLOSED SPACE

Samuil Ya. Levenson

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Head of Vibration 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, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Vibration Equipment Laboratory, tel.(383)217-06-12, e-mail: gen@misd.nsc.ru

Aleksey V. Morozov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Researcher, Vibration Equipment Laboratory, tel. (383)217-05-19, e-mail: alex02@ngs.ru

Mikhail A. Lantsevich

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Vibration Equipment Laboratory, tel. (383)220-14-98

The authors discuss issues relating design of compaction equipment for dispersion materials. Some findings of the research into vibration compaction of coherent materials are reported. The influence of vibration modes on the material density is demonstrated.

Key words: experiment, coherent material, vibration generator, vibration, vibration mode, compaction.

Уплотнение является одной из важнейших операций технологических процессов, использующихся в металлургии, горной и строительной отраслях промышленности [1], так как от плотности упаковки зависит прочность и работоспособность всей конструкции или изделия. Развитие экономики на современном этапе предполагает снижение энергетических затрат, рациональное и эффективное использование всех видов ресурсов. В частности, в настоящее время в металлургической промышленности осуществляется замена футеровок, выполненных из формованных материалов (например, кирпича), неформованными (сыпучими или связными). Применение в технологических процессах неформованных материалов позволяет снизить затраты на производство, повысить долговечность и эффективность укладки благодаря отсутствию швов, пустот и т.д. [2].

К неформованным материалам относятся огнеупорные бетоны (бетонные массы и смеси), торкрет-массы, набивные и пластичные массы, мертели, сухие смеси и материалы на их основе. Наиболее востребованными среди них являются огнеупорные бетоны и торкрет-массы.

Огнеупорные бетонные смеси успешно используются как в черной, так и в цветной металлургии, например для выполнения футеровок рабочих или теплоизоляционных слоев в конструкциях тепловых агрегатов. Формуемые изделия почти всегда имеют сложную форму. Для повышения их прочности и термостойкости применяются различные армирующие элементы, а образующиеся между ними пространства должны быть заполнены без пустот уплотненным материалом.

Например, при футеровании ванн электролизеров в алюминиевой промышленности строго регламентируется влажность используемых материалов. В связи с этим применение подвижных смесей (с большим содержанием влаги) становится нежелательным, так как усложняется процесс сушки. Несоблюдение требований к выполнению этого процесса приводит к появлению пустот или трещин в футеровочных слоях, что недопустимо.

Использование связных дисперсных материалов с малым содержанием влаги позволяет исключить отмеченные недостатки, но при этом возникают сложности как при заполнении формуемого изделия смесью, так и во время уплотнения (могут оставаться пустоты). Устройства и механизмы, используемые для укладки и последующего уплотнения связных дисперсных материалов, разнообразны по конструкции и взаимодействию исполнительного органа с обрабатываемым материалом. Однако в настоящее время отсутствуют устройства, способные обеспечить высокую плотность и исключить пустоты между армирующими элементами в конструкциях сложной пространственной формы.

В ИГД СО РАН разработан и защищен патентом РФ [3] способ уплотнения дисперсных материалов в замкнутом объеме с использованием вибрации. Проведены экспериментальные исследования процесса формования высокоплотного компакта мелкодисперсного материала этим способом. Установлены некоторые закономерности изменения плотности дисперсного материала при статическом нагружении с наложением вибрации различного частотного спектра [4].

Особенностью связных материалов является наличие существенного внутреннего сцепления, а при его уплотнении в замкнутом объеме сложной формы с армирующими элементами необходимо создать условия для уменьшения сил трения между частицами и обеспечить материалу подпор, который способствует заполнению пространств сложной формы.

Целью проводимых исследований является разработка и создание устройства, позволяющего производить укладку и уплотнение связных дисперсных материалов с малым содержанием влаги в армированных конструкциях с узкими проходными сечениями.

Для исследования процесса формирования компакта связного материала разработан и изготовлен стенд, на котором предусмотрена возможность независимого изменения амплитудно-частотных характеристик источников колебаний в диапазоне частот вибровоздействия от 35 до 100 Гц и продолжительности воздействия от 5 до 25 секунд. Изменение этих параметров в указанном диапазоне позволяет выбрать такой режим работы установки, при котором процесс формирования компакта из связного дисперсного материала протекает наиболее интенсивно.

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Он состоит из канала 1 прямоугольного сечения с армирующими элементами 2 (различной формы), которые образуют полости с узкими проходными сечениями, и уплотняющего устройства, осуществляющего укладку и уплотнение связного материала. Рабочий орган устройства представляет собой уплотняющую площадку 3 с раструбом 4, обеспечивающим подачу материала под нее и далее в пространство между армирующими элементами и под них. Уплотнение смеси под площадкой осуществляется вибровозбудителями, установленными на раструбе. К верхней части раструба крепится подводящий канал 5 с вибровозбудителем и бункер 6 для материала. Подводящий канал обеспечивает также предварительную обработку материала (вытеснение воздуха, разжижение). Кроме этого материал, находящийся в канале, обеспечивает подпор, что способствует интенсификации процесса уплотнения. Для визуального наблюдения за процессом формирования компакта на боковых стенках рабочего органа и канала с армирующими элементами имеются смотровые окна.

На стенде (рис. 1) реализуется процесс уплотнения в замкнутом объеме, суть которого заключается в следующем. В фиксированный момент времени часть предварительно уплотненного материала оказывается замкнутой в ограниченном пространстве. Его перемещению препятствует вновь поступающий, предварительно уплотненный материал из подводящего канала 5 (сверху), уже уплотненный материал в канале 1 (слева) и армирующие элементы, создающие сопротивление его свободному продвижению в еще не заполненное пространство (справа).



Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Эффективность передачи вибровоздействия обрабатываемому материалу обеспечивается за счет того, что вибровозбудители раструба и подводящего канала установлены на ложных днищах 7, соединенных с корпусом при помощи упругих элементов 8, которые позволяют уменьшить нежелательное вибрирование всего рабочего органа.

В качестве связного дисперсного материала в экспериментах использовалась сухая барьерная смесь. Наличие глинистой составляющей в ее составе позволяет изменять сцепление полученного материала за счет количества добавляемой в смесь воды.

Была выполнена серия экспериментов, в процессе которых изменялись параметры вибрационного воздействия: частота, вынуждающая сила и продолжи-

тельность процесса уплотнения и оценивалось их влияние на плотность полученного компакта материала.

Эксперименты показали (рис. 2), что наиболее интенсивно процесс формирования компакта протекает при вибровоздействии силой 3,0 – 4,0 кН в частотном диапазоне 40 – 55 Гц.



частота вибровоздействия: 1 - 32 Гц; 2 - 35 Гц; 3 - 45 Гц; 4 - 50 Гц; 5 - 40 Гц; 6 - 55 Гц

Для частот с наибольшей эффективностью уплотнения (40 – 55 Гц) исследовалась зависимость плотности компакта от времени вибровоздействия.

Установлено, что плотность достигает своего постоянного значения через 18 – 20 секунд после начала вибровоздействия, что соответствует скорости перемещения рабочего органа в пределах 0,35 – 0,4 м/мин. Дальнейшее увеличение времени приводит к незначительному изменению указанного параметра. Иллюстрация этого вывода приведена на рисунке 3 для частоты 40 Гц.

Визуальное наблюдение за ходом процесса уплотнения показало, что материал под воздействием вибрации хорошо разжижается и заполняет все предоставленное ему пространство, в том числе и под армирующими элементами.

Полученные предварительные результаты показывают, что при обоснованном выборе амплитудно-частотных характеристик вибровоздействия и геометрических параметров уплотняющего рабочего органа можно обеспечить качественное формирование компакта из связного дисперсного материала с малым содержанием влаги в армированных конструкциях с узкими проходными сечениями.



Рис. 3. Зависимость плотности связного дисперсного материала от продолжительности вибровоздействия: частота колебаний f = 40 Гц; вынуждающая сила F: 1 – 2,0 кH, 2 – 3,5 кH, 3 – 4,0 кH

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей. / Дисс. докт. техн. наук: 05.05.04 Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. – Омск – 2005–320 с.

2. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры. / Справочное издание. В 2-х томах. Т. 1. Книга 1. Общие вопросы технологии. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 448 с.

3. Патент на изобретение 2296819. МПК⁸ С 25 С 3/06, С 25 С 3/08 Способ формирования бесшовных футеровочных слоев в алюминиевых электролизерах и устройство для его осуществления / А.В. Прошкин, В.В. Пингин, В.С. Тимофеев, С.Я. Левенсон., Л.И. Гендлина, Ю.И. Еременко, В.А. Голдобин. № 20051266100/02; заявл. 17.08.2005; – опубл.10.04.2007, Бюл. № 10.

4. Гендлина Л.И. Результаты исследования процесса уплотнения дисперсных материалов вибрационным способом / Л.И. Гендлина, С.Я. Левенсон С.Я., Ю.И. Еременко, В.В. Виданов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. - 2011 - № 8 – С. 255-259.

© С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, А. В. Морозов, М. А. Ланцевич, 2015

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МЕТОДА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПРИ КОНТРОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

Аркадий Васильевич Леонтьев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-06-36, e-mail: leon@misd.nsc.ru

Изложены теоретические предпосылки метода измерительного гидроразрыва пород в скважине. Отмечены особенности применения метода при контроле напряжений в монолитном массиве горных пород, при наличии естественных трещин, а также в проницаемой среде.

Ключевые слова: массив горных пород, контроль напряжений, гидроразрыв пород в скважине.

FEATURES OF HYDRAULIC FRACTURING FOR STRESS MEASUREMENT AND CONTROL IN MINES

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

The paper presents theoretical pre-conditions for hydraulic fracturing for stress measurement in holes. The author specifies features of the method application in solid rock mass, in rocks with natural cracks and in permeable medium.

Key words: rock mass, stress control, hydraulic fracturing.

Сведения о напряженном состоянии породного массива необходимы для принятия правильных решений при проектировании и строительстве подземных сооружений, а также при отработке месторождений полезных ископаемых. Среди способов экспериментального определения напряженного состояния породных массивов своей высокой универсальностью выделяется метод измерительного гидроразрыва пород в скважине [1,2]. Ее характеризуют два отличительных признака: размер исследуемого (в единичном опыте) объема горной породы и возможность применения в глубоких скважинах (на больших расстояниях от наблюдателя до исследуемого участка массива).

Техника гидроразрыва пород в скважине состоит в том, что участок скважины протяженностью в 4-5 диаметров перекрывается с помощью двухпакерного зонда и подвергается нагружению путем нагнетания в него жидкости вплоть до достижения критических растягивающих напряжений на стенке скважины, приводящих к разрыву пород. Данная схема широко применяется не только в технологических, но и в чисто исследовательских целях. Основу измерительного гидроразрыва (см. рис.) составляет то, что критические давления зависят не только от прочности пород, но и от уровня действующих в них напряжений. При этом управление режимом нагнетания, а также возможность проведения повторных нагружений выбранного интервала позволяют выделить на диаграммах «давление-время» характерные значения этих параметров, которые затем интерпретируются в терминах напряжений, действующих в породном массиве. К таким значениям относятся: P_c – давление разрыва пород при первом нагружении; P_r – давление раскрытия трещины при повторных нагружениях; P_s – давление запирания. Поскольку давление и напряжение имеют одну размерность, для оценки исходных напряжений нет необходимости знать фактические значения деформационных параметров пород, что выгодно отличает метод гидроразрыва от большинства механических способов измерения напряжений.



Рис. Идеализированная кривая «давление Р – время t» при гидроразрыве слабопроницаемых пород (Q – расход флюида)

Классическая схема определения напряжений по данным гидроразрыва строится на следующих основных предпосылках:

 массив представлен крепкими скальными породами, поведение которых в окрестности скважины описывается упругими соотношениями;

 ось скважины ориентирована в направлении одного из главных напряжений исходного поля;

– нагружение осуществляется с достаточно высокой скоростью, чтобы пренебречь фильтрационными потерями и поровым давлением;

 – разрушение инициируется на стенке скважины по площадке с наибольшим растягивающим тангенциальным напряжением;

– давление запирания соответствует наименьшей компоненте главных напряжений, перпендикулярной плоскости разрыва.

В сделанных предположениях пересчет характерных давлений гидроразрыва в напряжения осуществляется, исходя из следующих соотношений:

$$P_{\rm c} = 3 \,\sigma_{\rm min} - \sigma_{\rm max} + T; P_{\rm r} = 3 \,\sigma_{\rm min} - \sigma_{\rm max}; P_{\rm s} = \sigma_{\rm min} \,. \tag{1}$$

Здесь σ_{\min} , σ_{\max} – наименьшая и наибольшая компоненты главных напряжений в плоскости, ортогональной оси скважины, соответственно; T – прочность пород на отрыв.

Отсюда сразу получаются искомые оценки напряжений: $\sigma_{\min} = P_s$ и $\sigma_{\max} = 3P_s - P_r$, а также значения прочности на отрыв $T = P_c - P_r$. Давление запирания $P_s - д$ авление, соответствующее моменту равновесного состояния открытой трещины разрыва, когда давление флюида уравновешивает воздействие нормальных к плоскости трещины напряжений в породном массиве.

Нетрудно видеть, что по измерениям в одной скважине не удается определить все компоненты исходного поля напряжений. Для первых работ в области гидроразрыва, где предметом рассмотрения являлись опыты в вертикальных нефтяных и геолого-разведочных скважинах, выход был достаточно простым – по давлениям гидроразрыва определяются наибольшее $S_{\rm H}$ и наименьшее $S_{\rm h}$ горизонтальные напряжения, а вертикальная составляющая $S_{\rm V}$ оценивается по весу покрывающих пород γH (γ – плотность, осредненная по глубине). Развитие экспериментальных работ показало справедливость такого подхода за исключением случаев, когда вертикальная составляющая является наименьшим главным напряжением (т.е. $S_{\rm V} < S_{\rm h}$), что имеет место в тектонически напряженных массивах. Выяснилось также, что возможны ситуации, когда поверхность гидроразрыва первоначально параллельная образующей скважины, в процессе развития разворачивается в горизонтальную плоскость, а давление запирания дает оценку уже не $S_{\rm h}$, а $S_{\rm V}$.

При проведении измерений в шахтных условиях, как правило, есть возможность использования разно ориентированных скважин и получать необходимые данные для определения всех компонент исходного поля напряжений в массиве.

В табл. показано, какие параметры напряженного состояния массива определяются по измерениям в различно ориентированных скважинах в зависимости от соотношения исходных напряжений.

Таблица

Ориентация	Соотношения компонент действующих напряжений				
скважины	$S_{ m V}~< S_{ m h} <~S_{ m H}$	$Sh < S_{\rm V} < S_{\rm H}$	$S_{ m h}~< S_{ m H} <~S_{ m V}$		
V	$\gamma H S_{\rm h}^* S_{\rm H}^{\bullet}$ или $S_{\rm V}^* (3S_{\rm h} - S_{\rm H})$	$\gamma H S_{\rm h}^* S_{\rm H}^{\bullet}$	$\gamma H S_{\rm h}^{*} S_{\rm H}^{\bullet}$		
Н	$S_{ m V}^{*}$ S_{h}	$S_V \bullet S_h^*$	$S_{\rm V} \bullet S_{\rm h}^{*}$		
h	$S_{\rm V}^{*}$ $S_{\rm H}^{\bullet}$	$S_{\rm V}^*$ $S_{\rm H}$ или γH $S_{\rm h}^*$ $(3S_{\rm V} - S_{\rm H})^{\bullet}$	$S_{\rm V}$ $S_{\rm H}^{*}$ или γH $S_{\rm h}^{*}$ $(3S_{\rm H} - S_{\rm V})^{\bullet}$		

Примечания:

*- помечена компонента напряжений, определяемая непосредственно по давлению запирания $P_{\rm S}$ на диаграмме «давление-время»;

[•]– помечена компонента или комбинация напряжений, определяемая по давлению раскрытия $P_{\rm r}$ с использованием значений коэффициентов концентрации напряжений на стенке скважины по упругому решению. Важным элементом технологии измерительного гидроразрыва является локация следа трещины на поверхности скважины. Тангенциальный угол продольного (вдоль образующей) следа трещины указывает направление действия наибольших сжимающих напряжений. Наличие двойного следа (комбинация продольной и поперечной трещины) свидетельствует о развороте первоначального продольного разрыва. Наклонный след говорит о том, что ориентация скважины не совпадает с направлением одного из главных напряжений. Сказанное выше справедливо лишь для монолитных, слабо трещиноватых пород. Наличие естественных трещин и поверхностей ослабления, которые могут иметь произвольную ориентацию и, соответственно, предопределять ориентацию разрыва, должно выявляться до проведения собственно гидроразрыва пород. Другими словами, применение любого из ниже перечисленных способов локации следа трещины предусматривает, что один и тот же участок скважины обследуется дважды – до и после проведения гидроразрыва.

Известны следующие способы локации следа трещины:

 – оптический – визуальный контроль с помощью специальных устройств типа скважинных телевизоров; необводненные скважины;

– механический – получение отпечатка поверхности скважины на импрессионном пакере;

– геофизический – сканирование поверхности скважины акустическими приборами.

Накопленный практический опыт свидетельствует, что проведение таких измерений представляет самостоятельный и весьма трудоемкий этап в технике экспериментальных работ и не всегда обеспечивает уверенную локацию трещины. При проведении гидроразрыва в шахтных условиях, как правило, применяются два первых способа.

Классическая схема определения полного тензора исходных напряжений в массиве методом гидроразрыва в шахтных условиях состоит в следующем. На основании косвенных данных оценивается ориентация одного из главных напряжений в массиве (часто за главное можно принять вертикальное направление). В этом направлении проводится первая измерительная скважина. Вне зоны влияния выработки выполняется серия опытов, по которым определяется величина и ориентация двух других главных напряжений. В направлении одного из них проводится вторая измерительная скважина. Измерения в ней на достаточном удалении от борта выработки (1–1.5 поперечного размера) позволяют оценить последнее главное напряжение. Наличие третьей скважины, ортогональной первым двум, обеспечивает получение дополнительной информации, позволяющей контролировать согласованность и достоверность искомых оценок.

Оценка вертикальных напряжений по весу налегающих пород оправдана лишь вне зоны влияния больших очистных пространств или крупных геологических нарушений. В противном случае вертикальная составляющая может не являться главным напряжением и, как следствие, описанный выше порядок неприемлем. Не удается реализовать его и без надежных технических средств осмотра поверхности скважины. Наличие в измерительном интервале естественных трещин приводит к тому, что именно с них начинается развитие трещины гидроразрыва. В дальнейшем трещина разрыва может сменить ориентацию и развиваться нормально минимальному сжимающему напряжению. В этом случае давление запирания дает надежную оценку минимальной компоненты, но давление разрыва (раскрытия) трещины может быть значительно ниже предсказываемых формулой (1). Для выбора ненарушенных участков скважины рекомендуется перед разрывом выполнять тест на фильтрацию, а также использовать данные кернового бурения.

Принципиально другой подход состоит в том, что специально отыскиваются участки скважины с единственной пересекающей скважину трещиной или поверхностью ослабления и фиксируется ее пространственная ориентация, определяемая вектором нормали \bar{n} . Экспериментально (по схеме гидроразрыва) измеряется давление P_n , уравновешивающее нормальную составляющую горного давления на поверхности трещины. А далее выборка $\{P_{nk}; k = \overline{1,K}\}$, где K – общее число тестов на произвольно ориентированных трещинах, обрабатывается совместно, исходя из того, что при известной ориентации трещины теоретическое значение давления P_n является линейной функцией компонент исходного поля напряжений $f(\sigma_{ij}^0; \overline{n_k})$. Рассматривая конкретные замеры как случайные величины, нормально распределенные около «истинных» значений, исходные напряжения находят из условия минимума функции отклонений

$$\sum_{k=1}^{K} \left[P_{nk} - f(\sigma_{ij}^{0}; \overline{n_{k}}) \right]^{2} \xrightarrow[\sigma_{ij}^{0}]{} \longrightarrow \min$$
(2)

Интерпретация данных гидроразрыва в проницаемых, пористых средах по формулам (1) дает завышенную оценку максимальных напряжений. Для учета фильтрационных потерь и порового давления предложены соотношения:

$$P_{c} = \frac{3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + T - \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} P_{0}}{1 + \beta - \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}},$$

$$P_{s} = \sigma_{\min} + P_{0},$$
(3)

где $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ – эффективные главные напряжения, связанные с суммарными напряжениями соотношениями $\sigma_i = S_i - \beta P_0$; P_0 – поровое давление; T – прочность на растяжение; ν – коэффициент Пуассона; α – константа Биота, связанная

с суммарной и матричной сжимаемостью среды C_b и C_r соотношением $\alpha = 1 - C_b / C_r$; P_s – мгновенное давление запирания.

Предполагается, что операционная жидкость и поровый флюид имеют одинаковую вязкость. Величина мгновенного давления запирания определяется следующим образом: к участку кривой «давление-время», описывающему ста-

дию быстрого спада давления после прекращения подачи жидкости в момент запирания соответствует точке, в которой кривая давления начинает значимо отклоняться от касательной.

Использование соотношений (3) предполагает, что входящие в него механические константы среды α , β , ν и *T*, а также поровое давление P_0 известны.

Если уровень действующих напряжений достаточно высок, концентрация сжимающих напряжений на контуре скважины может превысить предел упругости. Наличие пластических деформаций приводит к более низким значениям критических давлений, чем это следует из линейной теории упругости. Это обстоятельство является существенным при измерениях в слабых горных породах, грунтах, солях. Здесь возможны различные подходы: корректирование коэффициентов концентрации, входящих в соотношения (1), анализ кривой «давление-время» на качественном уровне (например, в солях при неравнокомпонентном поле напряжений отмечается выраженный максимум давления, тогда как при равномерном всестороннем сжатии наблюдается пологий рост и спад давления после достижения P_c) и др.

Таким образом, интерпретация данных гидроразрыва при контроле напряжений в массиве должна производиться с учетом фактического состояния породной среды, что предполагает, в свою очередь, предварительное и окончательное обследование измерительных скважин с помощью специальных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Y. Mizuta, S. Kikuchi, K. Tokunaga. Studies on Hydraulic Fracturing Stress Measurement Assisted by Water Jet Borehole Slotting. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1993. – Vol. 30, – No. 7. – pp. 981-984.

2. G. Klee, A. Bunger, G. Meyer, F. Rummel, B. Shen. In Situ Stresses in Borehole-1/South Australia Derived from Breakouts, Cjre Discing and Hydraulic Fracturing to 2 km Depth. // Rock Mech. Rock Eng. (2011). – V 44, No. 5, pp. 531-540.

© А. В. Леонтьев, 2015

УДК 622.831.3:512.2

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ В ЗОНЕ ПОДРАБОТКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА

Владимир Федорович Линейцев

Карьер «Борок», 630009, Россия, г. Новосибирск, ул. Декабристов, 210, главный инженер, тел. (913)724-64-05

Валентина Ивановна Щелканова

Таштагольский горный техникум, 652992, Россия, Кемеровская обл., г. Таштагол, ул. Поспелова, 6, зам. директора по научной работе, тел. (83847)33-04-77

Геннадий Иванович Кулаков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-07, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

Выполнены исследования электромагнитной эмиссии (ЭМИ) поверхностного слоя и его трещиноватости в пределах шахтного поля Таштагольского рудника с использованием приборов РЭМИ-2 и ИЭМИ-1, разработанных совместно ИГД СО РАН и НГТУ. Регистрация ЭМИ выполнялась в зоне провала и по радиусам на расстоянии от 100 до 300–500 м.

Ключевые слова: рудная шахта, шахтное поле, электромагнитное излучение (ЭМИ), трещиноватость поверхностного слоя, регистрация ЭМИ, приборы по регистрации ЭМИ.

ELECTROMAGNETIC EMISSION IN THE ZONE OF GROUND SURFACE UNDERMINED BY THE TASHTAGOL MINE

Vladimir F. Lineitsev

Borok Open Pit Mine, 630009, Russia, Novosibirsk, 210 Dekabristov St., Principal Engineer, tel. (913)724-64-05

Valentina I. Shchelkanova

Tashtagol Mining College, Tashtagol, 652992, Russia, Kemerovo Region, Tashtagol, 6 Pospelova St., Deputy Director for Science, tel. (83847)33-04-77

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: kulakova.38@yandex.ru

The authors study electromagnetic emission and jointing of the ground surface layer within the Tashtagol mine field using REMI-2 and IEMI-1 instrument groups designed by the Institute of Mining jointly with the Novosibirsk State Technical University. Electromagnetic emission recording was carried out within the minefield, in the zone of a sink and along the radii from 100 m (in the woodland) to 300–500 m long (area with no trees and bushes).

Key words: underground mine, mine field, electromagnetic emission (EMI), subsurface layer jointing, EMI recording, EMI requiring equipment.

Месторождения железных руд Таштагольское, Шерегешевское, Казское расположены в Горной Шории и входят в структуру ОАО «Евразруда». Месторождения открыты геологами в 30-х годах прошлого века. Добыча руды на Таштагольском месторождении начата в 40-х годах прошлого века. Главное рудное тело выходило на поверхности, что позволило начать разработку открытым способом. Первый карьер действовал в годы войны. Позднее начата добыча подземным способом. К настоящему времени горные работы достигли глубины 700-800 м. Отработаны или дорабатываются запасы на горизонтах +70 м, +140 м, -210 м, -280 м. Ведутся работы на гор. -350 м. Добытая руда поступает на Мундыбашскую обогатительную фабрику и далее на металлургические заводы Западной Сибири.

Залегание рудных тел крутопадающее, составляет 70-85[°]. Мощность рудных тел от 4-10 м до 60-80 м. Руды магнетитовые. Образовались за счет замещения магнетитом вулкагенно-осадочных карбонатных пород, включая метаморфические сланцы и мраморизованные известняки.

Интрузивные породы представлены габропорфиритами, скарнами, сиенитами. Прочность вмещающих пород по Протодъяконову 8-14, руд 14-16.

Руды магнетитовые, сульфидно-магнетитовые, гематит-магнетитовые. Таштагольское месторождение открыто в 1931 г. Часть рудных тел выходило на поверхность, что позволило на первом этапе вести добычу руды открытым способом. К добыче приступили в 1941 г. Подземная добыча ведется с 1946 г.

Экспериментальные наблюдения за сдвижениями земной поверхности и горных пород на Таштагольском месторождении ведутся долгое время велись институтом ВостНИГРИ [1,2] и продолжаются СибГИУ. Т.В. Лобанова [2] отмечает, что сдвижения земной поверхности в лежачем боку месторождения происходят с образованием всех зон сдвижения. В висячем боку за зоной провала зоны обрушения не наблюдается. По мере развития подземных работ провалы поверхности соединились с котлованом карьера. Размеры наблюдаемых провала и обрушений по данным [2] на 2005 г. составили: с северо-западной стороны 175-230 м, с северной стороны до 150 м. Размеры мульды сдвижения по простиранию месторождения составляют 1204 м, вкрест простирания достигают 1440 м.

Специалисты ИГД СО РАН, Таштагольского горного техникума и службы горных ударов рудника проводят исследования по регистрации электромагнитного излучения поверхности в зоне провала и в зоне мульды сдвижения вне зоны горных работ Таштагольского рудника. Для регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) использовались приборы РЭМИ-2 и ИЭМИ-1 [3-5]. Вследствие крутых стенок обвала и значительной его глубины измерения непосредственно в провале не проводились. Измерениями был охвачен северный край провала и прилегающая зона до первых значительных трещин.

Результаты измерений фиксировались в показаниях шкалы приборов. Наличие повышенного ЭМИ земной поверхности зафиксировано в зоне, прилегающей к провалу, и в зоне формирования трещин по площади мульды сдвижения. Достаточно длительные измерения фонового ЭМИ в зоне мульды сдвижения не остаются постоянными, а периодически изменяются, что свидетельствует о том, что в массиве пород постоянно идут процессы изменения напряженнодеформированного состояния [3,4,7].

Наибольшая интенсивность ЭМИ наблюдалась вблизи кромки провала, примерно, одинаково по всему борту. На противоположном борту провала магнитное поле не замерялось ввиду отсутствия безопасных подходов к соответствующей кромке провала. В зоне мульды сдвижения на север от провала фиксируемые величины ЭМИ были меньше, чем в районе борта и зоны трещин. Некоторые данные о результатах регистрации ЭМИ в различных зонах шахтного поля, а также в различных участках мульды сдвижения приведены в табл.

Дата приведенных измерений относятся к маю 2012 г. Аналогичные результаты были получены в 2006 и в 2009 гг., при опытных измерениях, когда было установлено наличие повышенного ЭМИ в пределах мульды сдвижения.

Таблица

Участки измерений в пределах	Время	Показания прибора ИЭМИ-1 в
шахтного поля	суток	отн. Ед. шкалы прибора
1. Вне шахтного поля Таштагольского рудника	17-00	60, 62, 58, 64, 71
	17=15	60, 63, 59
	17-30	61, 66, 73
2. Интенсивность ЭМИ в пределах шахтного		73, 72, 73, 77
поля, примерно в 0.5 км от зоны мульды сдви-		75, 77, 72, 78, 78
жения		82, 81, 75, 77
3. В зоне трещинообразования в пределах	15-30	88, 90,93,101
мульды сдвтжения	16-10	93, 90,84,86
	16-15	94, 86, 90
4. В зоне между бортом провала и зоной тре-	14-15	130, 115, 121
щинообразования	15-00	125, 107, 99
	16-30	90, 92, 93, 98

Интенсивность ЭМИ в различных участках шахтного поля

Из данных экспериментальных исследований можно заключить, что в зонах поверхности шахтного поля действующего рудника, на участках в пределах мульды сдвижения, включая зону провала горных пород за счет выемки горной массы подземными работами, на поверхности формируются магнитные и электромагнитные поля, в пределах которых наблюдается повышенное ЭМИ. Наибольшая интенсивность излучения зафиксирована в области шахтного поля в пределах мульды сдвижения между бортами провала и зоной повышенной трещиноватости мульды сдвижения (п. 4 таблицы). По мере удаления от провала интенсивность ЭМИ снижается, но наблюдается во всей области, составляющих мульду сдвижения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квочин В.А. Управление сдвижением и удароопасностью горного массива при разработке железорудных месторождений Сибири на основе изучения их геодинамики. / Авторефер. дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – Новокузнецк, 2000. – 78 с.

2. Лобанова Т.В. Разработка научно-методических основ геомеханического обеспечения подземной отработки железорудных месторождений Сибири в геодинамических активных регионах. / Автореф. дисс. на соис. уч. ст. д.т.н. – Новосибирск, 2007. – 53 с.

3. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. // – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 232 с.

4. Егоров П.Б., Колганова Л.А., Бабенко А.В., Торгаев С.А. Исследование изменений форм сигналов импульсного электромагнитного излучения при деформировании твердых материалов с различной структурой. / Вестник Кузбасского гос. тех. ун-та. – 2004. – № 2 (39). – С. 34-37.

5. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. // – Новосибирск: ИГД СО РАН– 2008. – 315 с.

6. Лобанова Т.В., Квочин В.А. Перспективы отработки железорудных месторождений Сибири в условиях подработки горного массива и охраняемых объектов. / Труды Междунар. конф., посвященной 60-летию образования Горно-геологического института СО АН СССР «Проблемы и перспективы развития горных наук. – Новосибирск: Институт горного дела СО РАН. – 2005. Том 1,С. 128-136.

7. Лобанова Т.В., Квочин В.А., Линдын Г.Л., Фефелов С.В. Расчетные схемы для оценки напряженно-деформированного состояния массива в зоне очистных работ. / Труды Международной конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2001. – С. 315-319.

© В. Ф. Линейцев, В. И. Щелканова, Г. И. Кулаков, 2015

УДК 539.375

РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА ВБЛИЗИ ЖЕСТКОГО ЭКРАНА

Петр Александрович Мартынюк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, тел. (383)335-96-54, e-mail: martinjuk@ ngs.ru

Игорь Владимирович Колыхалов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)335-96-54, e-mail: 9231777577@mail.ru

В условиях плоской деформации численно исследован процесс развития трещины гидроразрыва вблизи экрана. Экран моделируется прямолинейной трещиной конечной длины, заполненной проппантом. В качестве рабочей жидкости рассматривалась идеальная и вязкая. Проанализировано влияние на параметры растущей трещины расстояния до экрана, внешнего поля сжатия, расхода, вязкости и утечек.

Ключевые слова: поинтервальный гидроразрыв пласта, поле сжатия, вязкость жидкости, утечки.

HYDRAULIC FRACTURING AT RIGID SHIELD

Peter A. Martynyuk

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Phys-Math, tel. (383)335-96-54, e-mail: martinjuk@ ngs.ru

Igor V. Kolykhalov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, tel. (383)335-96-54, e-mail: 9231777577@mail.ru

The authors analyze numerically the growth of hydrofracture in the vicinity of shield in the plane strain conditions. The shield is simulated by a finite-length rectilinear fracture filled with proppant. Fluid is assumed to be ideal and viscous. The analysis involves the effect exerted by distance from the shield, external compression, fluid flow rate, fluid viscosity and leakage on the parameters of the growing hydrofracture.

Key words: hydraulic fracturing, compression field, fluid viscosity, leakage.

Для слабо проницаемых пород с низкой концентрацией углеводородов наиболее эффективным методом их извлечения является поинтервальный гидроразрыв [1]. Проводится бурение длинной горизонтальной скважины и последовательно создаются трещины гидроразрыва перпендикулярные скважине через определенный интервал с целью максимально увеличить площадь поступления углеводородов

Постановка задачи. Проанализируем первый этап – развитие одной трещины вблизи экрана. Для этого рассмотрим задачу. В неограниченной плоскости,

сжатой на бесконечности напряжениями p и q, в начальный момент имеются две прямолинейные трещины, параллельные оси Ox, длиной L и l_0 - рис. 1. Максимальное сжатие направлено по оси Ox. Берега трещины-экрана раскрыты и скачок нормальных смещений в ее центре u_0 - заданная величина. Эта трещина считается посаженной на проппант – ее профиль и длина в процессе развития второй трещины сохраняются. В произвольный момент времени форма второй трещины определяется выражением



Рис. 1. Геометрия постановки задачи

Касательные напряжения τ_s на берегах трещин равны нулю, а нормальные напряжения $\sigma_n = -p_1$ для экрана и $\sigma_n = -p_2(s,t)$ для растущей трещины. Здесь *s* - дуговая координата по длине ее крыла, *t* - время. Задача рассматривается как суперпозиция двух задач. В первой на бесконечности действует поле сжатия и границы трещин свободны, а во второй – внешнее поле отсутствует и на границах действуют только соответствующие σ_n . В результате приходим к задаче с граничными условиями:

первая трещина $\sigma_n = -p_1 - q; \quad \tau_s = 0;$

вторая трещина $\sigma_n = -p_2(s,t) - \sigma_{n0}(s); \quad \tau_s = -\tau_{s0}(s);$

где σ_{n0} , τ_{s0} - напряжения, вызванные внешним полем сжатия, которые являются соответственно реальной и мнимой частями функции

$$f(z) = \frac{p+q}{2} - \frac{p-q}{2} \frac{d\overline{z}}{dz}.$$

Из известного решения для изолированной прямолинейной трещины длиной *L*, получаем

$$p_1 + q = \frac{u_0 E}{4(1 - v^2)L},$$

где *E*- модуль упругости среды, *v*- коэффициент Пуассона. Трещина-экран с максимальным раскрытием u_0 создает дополнительные напряжения σ_{np} и τ_{sp} на границе растущей трещины, которые определяются как реальная и мнимая части функции

$$f_p(z) = -(p_1 + q) \left[2\operatorname{Re}(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 - L^2}}) + \frac{d\overline{z}}{dz} \frac{L^2(z - \overline{z})}{(\overline{z}^2 - L^2)^{1.5}} \right].$$

Рассмотрим вновь эту задачу как суперпозицию двух. В первой экран раскрыт и границы второй трещины свободны, а во второй экран сомкнут и на границах второй трещины действуют σ_n и τ_s , выписанные выше. В результате решение задачи сводится к нахождению решения только для одной растущей трещины, на берегах которой выполняются граничные условия

$$\sigma_n = -p_2(s,t) - \sigma_{n0}(s) - \sigma_{np}(s); \quad \tau_s = -\tau_{s0}(s) - \tau_{sp}(s).$$

Численное решение поставленной задачи проводилось двумя методами - методом разрывных смещений [2,3] и методом сингулярных интегральных уравнений [4]. Использовался пошаговый алгоритм построения траектории растущей трещины [4,5].

Если жидкость идеальная, то давление по длине трещины постоянное и $p_2(s,t) = p(t)$. В качестве условий, определяющих процесс роста трещины, выступают – а) условие предельного равновесия, б) не уменьшение объема трещины, в) условие протекания – раскрытие по длине должно быть положительным. Если жидкость вязкая, то используется приближение А.М. Линькова [6].

$$\Delta p(s,t) = p_2(s,t) + \sigma_{n0}(s) = \left(\frac{\mu}{1-\nu}\right)^{0.75} (6\mu_0 q_0)^{0.25} \frac{(l-s)^{0.25}}{l^{0.75}},$$

где l = l(t)- длина крыла трещины, $\mu = E/2(1 + v)$ - модуль сдвига, q_0 - расход в крыло трещины на единицу ее высоты, μ_0 - вязкость жидкости. В предположении, что расход по длине трещины сохраняется [6] из уравнения

$$q_0 \approx \frac{dV}{dl} l(t) + 2C \int_0^t \frac{l(\tau)d\tau}{\sqrt{t-\tau}}$$

находится скорость трещины l(t). Здесь V - объем крыла трещины на единицу ее высоты, C - эмпирическая постоянная утечек. Шаг приращения длины трещины будет $\Delta l = l(t)\Delta t$ (Δt - шаг по времени). В работе [7] проведена оценка такого приближенного подхода учета вязкости.

Анализ результатов расчетов. Ниже приводятся некоторые результаты численных расчетов, выполненные при следующих значениях параметров $p = -39,5M\Pi a$, $q = -38,5M\Pi a$, v = 0,3, $E = 3 \cdot 10^4 M\Pi a$, вязкость разрушения $K_{1c} = 3M\Pi a \cdot m^{0.5}$, $\mu_0 = 1,2 \cdot 10^{-6} M\Pi a \cdot c$, $q_0 = 0,001 m^2/c$, L = 60m, $l_0 = 2m$. На рис.2а представлены траектории трещин гидроразрыва, когда жидкость идеальная и $h = 20 \div 80m$. Сплошные линии соответствуют $u_0 = 9,13mm$, а прерывистые - $u_0 = 4,5mm$. Отклонение от горизонтального распространения трещин Δ_0

при $x \approx 60 m$ примерно в 2,4 раза больше для $u_0 = 9,13 m$, чем для $u_0 = 4,5 m$. Отметим, что профили раскрытия трещин сильно "вмяты" в центральной части, так раскрытие в центре трещины $[v_2(0)] \approx 0,001 m$ (при $u_0 = 9,13 m$) и $[v_2(0)] \approx 0,2-1 m$ (при $u_0 = 4,5 m$). Малые раскрытия препятствуют транспортировке проппанта. С увеличением h объем трещины растет при $u_0 = 4,5 m$ и уменьшается при $u_0 = 9,13 m$. Эти результаты отвечают равновесному режиму развития трещин с постоянным приращением ее длины и практически совпадают при использовании двух методов численного расчета. Если увеличивать p или раскрывающее давление в трещине, то уменьшается Δ_0 и увеличивается раскрытие. Заметим, что максимальное Δ_0 отвечает h = 30 m.



Рис. 2. Пояснения в тексте

На практике для гидроразрыва используется вязкая жидкость. На рис. 26 изображены расчетные траектории для $u_0 = 4,5$ мм, когда жидкость вязкая и утечки равны нулю. Здесь процесс рассматривается во времени. Профили трещин плавные без вмятин – максимальное раскрытие в центре. С увеличением h длительность процесса, объем трещин и раскрытие возрастают.

В табл. 1 приведены значения при l = 60 m в числителе для $u_0 = 4,5 mm$, в знаменателе для $u_0 = 9,13 mm$. Максимальное отклонение Δ_0 соответствует h = 30 m, и отношение Δ_0 при $u_0 = 9,13 mm$ к Δ_0 при $u_0 = 4,5 mm$ меняется от 2,76 до 2,38 при h = 20 - 80 m. Отметим, что увеличение вязкости в 2 раза, увеличивает раскрывающее давление, что приводит к уменьшению Δ_0 и возрастанию раскрытия в центре трещины. Для $u_0 = 9,13 mm$ при $h = 20 m \Delta_0 = 10,67 mm$, $[v_2(0)] = 6,13 mm$; при $h = 80 m \Delta_0 = 5,36 mm$, $[v_2(0)] = 10,04 mm$. Если сохранить значение μ_0 , но увеличить в 2 раза расход, то раскрывающее давление сохраняется и формы траекторий не изменяться, но время процесса уменьшится в 2 раза.

Таблица 1

h ,м	20	25	30	40	50	60	80
Δ_0 ,м	4,63	4,80	4,83	4,58	4,11	3,6	2,61
	12,80	12,97	12,83	11,79	10,36	8,80	6,21
[<i>v</i> ₂ (0)],мм	7,72	7,90	8,19	8,48	8,85	9,19	9,74
	4,06	4,43	4,80	5,51	6,19	6,80	7,87
T, c	357	366	375	393	408	423	444
	210	228	246	276	303	324	366

Постоянная утечек С не входит в выражение для $\Delta p(s,t)$, поэтому ее изменение не влияет на форму траекторий, на ее объем, на $\Delta p(0,t)$ и $[v_2(0)]$, которые зависят только от длины растущей трещины, но оказывает существенное влияние на время протекания процесса и расход (потери) вязкой жидкости.

Данные в таблице 2 показывают влияние утечек на объем закаченной жидкости и время и соответствуют $q_0 = 0,001 M^2/c$; $\mu_0 = 2,4 \cdot 10^{-6}$ МПа; h = 30 M. В числителе значения, соответствующие l = 30 M, в знаменателе - l = 60 M. Потеря рабочей жидкости $\Delta V = V_3(C) - V_3(C = 0)$. Расчеты для вязкой жидкости выполнялись с использованием метода сингулярных уравнений. Используемый подход позволяет проследить последовательный поинтервальный гидроразрыв пласта для любого числа трещин.

Таблица 2

$C, \\ \mathcal{M}/c^{0,5}$	0	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0\cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	3,0.10 ⁻⁴
$V_{_3}, M^2$	$\frac{0,24}{0,68}$	$\frac{0,50}{1,74}$	$\frac{0,72}{2,66}$	$\frac{0,99}{3,90}$	$\frac{1,36}{5,44}$	$\frac{1,80}{7,32}$
Т, с	$\frac{120}{336}$	$\frac{250}{870}$	$\frac{360}{1330}$	$\frac{495}{1950}$	$\frac{680}{2720}$	$\frac{900}{3660}$

Заключение. Использование вязкого рабочего флюида приводит к тому, что траектории трещин меньше отклоняются от горизонтального направления и существенно увеличивается их раскрытие, по сравнению с идеальным флюидом. Варьируя значения вязкости и расхода, можно приблизиться к оптимальным параметрам гидроразрыва – отклонению Δ_0 и раскрытию. Утечки влияют только на время протекания процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00156).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Deimbacher F.X., Economides M.J., Jensen O.K. Generalized performance of hydraulic fractures with complex geometry intersecting horizontal wells. // SPE 25505, Production Operations Symposium. - 1993. - Oklahoma, USA.

2. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М: Мир, 1987. - 328 с.

3. Шер Е.Н., Колыхалов И.В. Особенности последовательного развития близко расположенных трещин гидроразрыва. // ФТПРПИ. -2011.- №6. - С. 43-53.

4. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1981. - 323с.

5. Мартынюк П.А. Особенности развития трещин гидроразрыва в поле сжатия. // ФТПРПИ. – 2008. – №6. - С. 19-29.

6. Линьков А.М. Численное моделирование течения жидкости и продвижения трещины гидроразрыва. // ФТПРПИ.-2008.-№1. - С. 26-46.

7. Мартынюк П.А., Панов А.В. О развитии нескольких трещин гидроразрыва в двуосном поле сжатия с учетом утечек и вязкости флюида. // ФТПРПИ.-2013. - № 1. - С. 22-33.

© П. А. Мартынюк И. В. Колыхалов, 2015

ДЕФОРМИРОВАНИЕ БЛОКОВ ПОРОД С ТРЕЩИНОЙ

Валерий Егорович Миренков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Андрей Анатольевич Красновский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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 горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: visanta@ngs.ru

Получена система сингулярных интегральных уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений в блоке пород, нагруженном расклинивающими нормальными усилиями. Приведено уравнение, определяющее нормальные напряжения на продолжении разреза в зависимости от компонент смещений контура блока. Представлена численная реализация этих уравнений. Проведен анализ деформированного и напряженного состояния блоков.

Ключевые слова: уравнение, трещина, напряжения, разрез, породный блок, упругость, решение.

DEFORMATION OF ROCK BLOCKS WITH CRACK

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, Ph. D. Phys-Math, Senior Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)217-06-93, e-mail: visanta@ngs.ru

The authors have derived a set of integral equations connecting boundary values of stresses and strains in a rock block exposed to normal wedging effort. The equation defining normal stresses on the extension of the cut depending on the components of displacement of the rock block perimeter is presented. The equations are implemented numerically. The stress–strain state of rock blocks is analyzed.

Key words: equation, crack, stress, cut, rock block, elasticity, solution.

Массив горных пород представляет набор блоков, отличающихся размерами и геометрией. При наличии трещин в блоках пород, нагруженных произвольными усилиями, как в натурных условиях, так и в лабораторных экспериментах, необходимо определить смещения контура и исследовать напряженное состояние. Известно [1], что изучение развития трещины в пластинах конечных размеров представляет огромный практический интерес, но для таких случаев не существует замкнутых форм решений. В случае деформационного критерия необходимо вычислить раскрытие трещин, так как экспериментально их определяют только в доступных точках. Очень сложны такие расчеты в случае нагружения, имеющего место в массиве за счет поступательного и вращательного движения геоблоков [2], учета механизма перехода объема пород из состояния уплотнения в состояние разуплотнения по разным направлениям [3]. В связи

с этим крайне важно развитие направления технологического использования нагружения тел с искусственными трещинами. Проведенные в работе исследования предполагают в дальнейшем использование метода суперпозиции для произвольного нагружения блоков, т. е. учета их взаимодействия с другими, в рамках контактной задачи Герца [4–5].

В [1, 6] утверждается, что коэффициент интенсивности напряжений получается из асимптотического разложения упругого решения при стремлении к вершине разреза, в то же время в [6] читаем "... модель линейной механики разрушения при $r \rightarrow 0$ "не работает". Поэтому определяющим всегда является уравнение для вычисления нормальных напряжений на продолжении разреза не связанное с асимптотическим анализом.

Рассмотрим деформирование блока пород с трещиной, схема нагружения которого представлена на рис. 1. Учитывая геометрическую и силовую симметрию, будем рассматривать половину блока с контуром $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$, для которого сформулируем граничные условия в виде

$$\begin{aligned} &\sigma_n = 0, & \text{ на } \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3, & \tau_n = 0, & \text{ на } \Gamma, \\ &\sigma_n = \sigma_0(y), & \text{ на } \Gamma_4 & \text{для } h_1 \leq y \leq h, \\ &\sigma_n = 0, & \text{ на } \Gamma_4 & \text{для } h_2 \leq y \leq h_1, \\ &u = 0, & \text{ на } \Gamma_4 & \text{для } 0 \leq y \leq h_2, \end{aligned}$$

где σ_n , τ_n — нормальные и касательные напряжения; $\sigma_0(y)$ — заданные, расклинивающие трещину усилия; *и* — горизонтальная компонента смещений.

Система уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений, приведена в [1].


Рис. 1. Расчетная схема расклинивания блока пород с трещиной Учитывая, что

на Γ_1 : t = s, $t_0 = x$, на Γ_2 : t = a + is, $t_0 = a + iy$, на Γ_3 : t = s + ih, $t_0 = x + ih$, на Γ_4 : t = -a + is, $t_0 = -a + iy$,

из (2) получаем ее численную реализацию аналогично [2]. Все линейные размеры отнесены к *a*, а величины, имеющие размерность напряжений, к σ_0 . Расчеты проводились при *a* = 1, *h* = 4, *h*₁ = 3.5, *k* = 2.077, μ = 3.846 \cdot 10⁴ для случаев

1)
$$h_2 = 3;$$
 2) $h_2 = 2;$ 3) $h_2 = 1;$ 4) $h_2 = 0.5.$ (4)

На рис. 2 представлены результаты расчета компонент смещений и значений f, отвечающих соответственно вариантам (8), для границы Γ , развернутой в прямую линию так, что Γ_1 соответствуют точки от 1 до 11, Γ_2 — от 11 до 51, Γ_3 – от 51 до 61 и Γ_4 — от 61 до 141. При соотношении h/a = 4 смещения u для Γ_2 и Γ_4 близки к линейным, а для Γ_3 — к жесткому сцеплению; компонента же vдля Γ_1 и Γ_3 практически линейна, а для Γ_2 и Γ_4 (на разрезе) близки к константе, на продолжении разреза (часть Γ_4) наблюдается монотонное убывание до нуля.

Компонента f(y), характеризующая главный вектор внешних усилий, приложенных к Γ_4 , в любой точке у определяет, согласно (3), нормальное напряжение

$$\sigma_n(y) = \sigma_x(y) = \frac{df(y)}{dy}.$$
(5)

Численное дифференцирование определяет для случаев (4) значения

$$y_0 = 1.8; 1.15; 0.55; 0.3,$$
 (6)

в которых $\sigma_x(y)$ обращается в нуль, разделяя область растягивающих напряжений в окрестности вершины разреза от области сжимающих при $y \ge y_0$.

Сравнение четырех значений f(y) на рис. 2 показывает, что увеличение длины разреза при прочих равных условиях приводит к тому, что равнодействующая растягивающих напряжений во много раз больше по модулю главного вектора внешних усилий, т. е.

$$\int_{h_2}^{y_0} \sigma_x(y) > \alpha \int_h^{h_1} \sigma_0 dy, \qquad (7)$$

где *а* — любое число большее 1 и зависящее от геометрии. Неравенство (7) сохраняется при любой геометрии образца с разрезом.

На рис. 3 приведены результаты расчета компонент смещений и значений f на Γ для случаев, рассмотренных в (4), с уменьшенным в четыре раза значением a, т. е. приближение случая изгиба балки усилиями $\sigma_0(y)$. Наблюдается качественное и количественное изменение напряженно-деформированного состояния. Действительно, если смещения u во всех точках грани Γ_3 остаются постоянными, существенно увеличиваясь по сравнению с данными рис. 2, то смещения граней Γ_2 и Γ_4 становятся нелинейными. Это же относится и к компоненте смещений *v*.



Рис. 3. Граничные значения смещений и усилий при h/a = 16

Наибольшие изменения наблюдаются для значений *f*, представленных на рис. 2, 3. Область растягивающих напряжений становится меньше и смещается к вершине разреза. Это же относится и к области сжимающих напряжений при увеличивающихся значениях соответствующих главных векторов.

Аналогично (6) имеем

$$y_0 = 2.8; 1.85; 0.85; 0.3.$$
 (8)

Отвечающие координатам (6) соответствующие значения f = -0.22; -0.65;-1.91; -3.91, а координатам (8) — f = -0.7; -1.62; -2.52; -4.06.

Этот факт очень важен, так как позволяет при любом виде контроля (акустическая, электромагнитная эмиссии и т. п.) за состоянием образца или массива пород констатировать, что увеличение напряжений и смещение равнодействующей их к обнажению является определяющим при подготовке динамического события. Другими словами, при неразрушающем контроле за напряженно-деформированным состоянием в натурных условиях необходимо фиксировать и координаты максимальных напряжений, а не только их рост. Полученные данные позволяют утверждать, что для этого вида нагружения и материала образцов величина разреза $hh_2 \ge 3.5$ является предельной, не зависящей от ширины пластины, когда трещина, начав движение, разделит блок на две части без дополнительного увеличения подводимой энергии.

Таким образом, получена система сингулярных интегральных уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений в блоке пород, нагруженном расклинивающими нормальными усилиями. Приведено уравнение, определяющее нормальные напряжения на продолжении разреза в зависимости от компонент смещений контура блока. Представлена численная реализация этих уравнений. Проведен анализ деформированного и напряженного состояния блоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 358 с..

2. Опарин В.Н., Акинин А.А., Востриков В.И., Юшкин В.Ф. Нелинейные деформационно-волновые процессы в окрестности выработок. // ФТПРПИ. – 2003 – № 4. – С. 3-18.

3. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скваженные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999 – С. 3-21.

4. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966 – 707 с.

5. Шутов А.В., Красновский А.А., Миренков В.Е. моделирование контактных условий при деформировании образцов пород. // ФТПРПИ. – 2004. – № 2. – С. 25-32.

6. Керштейн И.М., Клюшников В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А. Основы экспериментальной механики разрушения. – М.: Изд-во МГУ, 1989 – 126 с.

7. Миренков В.Е., Шутов В.А., Полуэктов В.А. Математическое моделирование пластин при сжатии. / Изв. вузов. Строительство. – 2004. – № 8. – С. 17-25.

© В. Е. Миренков, А. А. Красновский, 2015

УДК 622.831:539.3

ВОССТАНОВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ НА КОНТАКТЕ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ

Валерий Егорович Миренков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: mirenkov@misd.nsc.ru

Андрей Анатольевич Красновский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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 горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: visanta@ngs.ru

Получены уравнения, с помощью которых вычисляются компоненты напряжений и смещений для трех основных задач теории упругости, моделирующих деформирование отдельного блока или образца пород при лабораторных испытаниях. Приводятся примеры их численной реализации.

Ключевые слова: уравнения, напряжения, смещения, упругость, система, решение, задача.

RECOVERY OF CONTACT CONDITIONS IN SPECIMEN UNDER LOADING

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, Ph. D. Phys-Math, Senior Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)217-06-93, e-mail: visanta@ngs.ru

The authors have derived equations for calculating stresses and displacements in three basic problems of elasticity theory modeling deformation of a rock block or a rock specimen in laboratory testing. Numerical implementation of the equations is presented.

Key words: equations, stresses, displacements, elasticity, system, solution, problem.

Для изучения механизма разрушения горных пород, как правило, необходим комплекс аналитических и экспериментальных исследований. Параметры разрушения обычно зависят от условий нагружения и состояния контактных поверхностей. Контактные задачи сложны и существенно нелинейны вследствие подвижности границ и наличия трения между контактирующими поверхностями. Тонкие физические эффекты связаны с тем, что в области контакта взаимодействующих тел в процессе нагружения могут появляться проскальзывания. В зонах проскальзывания теряется запасенная энергия, поэтому функции нагружения и разгрузки, вообще говоря, не будут линейно упругими, что может вызвать изменение, например, сжимающего усилия.

Чтобы решать такие задачи, в идеале, необходима полная информация о трещинах и включениях, влиянии внешних воздействий на свойства пород, экспериментальные данные на всех доступных для измерения частях образца в процессе нагружения. Процедура определения констант и функций, характеризующих деформирование материала, основана на использовании данных, получаемых при механических испытаниях и при физических и породографических исследованиях. Эти проблемы для блочных сред рассматриваются в [1-3].

В статье представлено математическое моделирование напряженнодеформированного состояния прямоугольной области Ω (рис. 1). Выписана система интегральных уравнений, учитывающая в двумерном случае все компоненты граничных значений неизвестных функций для трех основных задач теории упругости на контуре $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$. Как правило, две из четырех компонент напряжений и смещений формулируются при постановке краевых задач, а остальные вычисляются из предлагаемой системы.



Рис. 1. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния образца пород

Во многих практически наиболее интересных случаях (испытания образцов пород, расчет деформирования целиков и т. п.) внешние усилия к Ω передаются через контакт с другими телами, так что известен, как правило, только главный вектор внешних усилий, прикладываемый Γ_1 или Γ_3 . В области контакта при этом невозможно строго сформулировать условия взаимодействия. Обычно предполагают простейшие варианты граничных условий, плохо моделирующих процесс нагружения, который сводится либо к идеальному проскальзыванию, либо к полному сцеплению в предположении абсолютной жесткости внешних по отношению к Ω тел [4].

В свете сказанного возникает задача получения необходимых натурных данных для уточнения контактных условий в рамках экспериментальноаналитического метода [5]. Это же относится и к проблеме обратных задач, например подбора граничных условий, обеспечивающих максимум несущей способности моделируемого объекта. Для области Ω , представленной на рис. 1, сформулируем граничные условия в виде трех задач:

Ha
$$\Gamma_1$$
 $\tau = \tau_0(x), v = v_0(x),$ (1)
Ha Γ_3 $\tau = \tau_0(x), v = -v_0(x);$
Ha Γ_1 $u = u_0(x), v = v_0(x),$ (2)
Ha Γ_3 $u = u_0(x), v = -v_0(x);$
Ha Γ_1 $\tau = \tau_0(x), \sigma_y = \sigma_{y0}(x),$

(3)

Ha Γ₃
$$au = au_0(x), ext{ } \sigma_y = -\sigma_{y0}(x),$$

для каждой из которых граничные условия на Γ_2 и Γ_4 одни и те же: $\tau = \sigma_x = 0$. Здесь τ , σ_x , σ_y — касательные и нормальные напряжения; u, v — компоненты смещения.

Система уравнений, связывающая граничные значения всех трех основных задач теории упругости, приведена в [6].

Учитывая симметрию геометрии и деформирования области Ω , система (4) дает решение любой из задач (1)–(3). Их численная реализация осуществлялась последовательными приближениями. За первое принимались величины, получаемые в левых частях от значений, сформулированных при постановке задачи, остальные неизвестные считались равными нулю. Вычисление приближений останавливалось, когда разность двух последних составляла 1%. Величины, имеющие размерность длины, отнесены к *a*, размерность напряжения – к σ_{y0} .

В качестве тестового примера рассматривался вариант граничных условий (3), когда $\tau_0(x) = 0$, $\sigma_{y0} = 1$. Результаты не приведены ввиду идеального совпадения с точным решением.

Для граничных условий в виде (1) принималось

$$\tau_0 = -Ax, \ 2\mu v_0 = 10.$$

На рис. 2 представлены результаты расчета деформирования области Ω при a = 1, h = 6, $\mu = 3.846 \cdot 10^4$, A = 1. Нормальные напряжения под штампом практически постоянны.

Для задачи (2) при $u_0(x) = 0$, $2\mu v_0 = 10$ и той же геометрии, что и в (1), результаты расчета показаны на рис. 3. Граница области Г развернута в прямую линию так, что Γ_1 соответствуют точки от 1 до 21, Γ_2 — от 21 до 41, Γ_3 — от 41 до 61 и Γ_4 — от 61 до 81. Результаты, аналогичные изображенным на рис. 2, не приводятся, так как отличие для данного случая заключается в нулевых горизонтальных смещениях точек $x = \pm a$. На рис. 2 смещения u(a) > 0.



Рис. 2. Контур Г ---- исходный, - - - после деформирования



Рис. 3. Компоненты смещения контура Ω для задачи (2)

Таким образом, во всех случаях, кроме одного, когда отсутствуют касательные напряжения на контакте, наблюдается бочкообразное деформирование образца. Чем больше касательные напряжения, тем больше деформируется область Ω .

Для более точного моделирования условий на контакте (граничные условия на Γ_1 и Γ_3) необходимо использовать экспериментальные данные [1]. Как правило, при сжатии образца на любой момент времени нагружения фиксируется уменьшение его длины и сжимающее усилие f(a). Этих данных достаточно, чтобы определить модуль Юнга образца.

На рис. 4 приведено решение задачи (3) при тех же параметрах, что и в задаче (2), но для A = 10, $\sigma_{v0} = 1$.



Рис. 4. Компоненты смещений контура Ω для задачи (3)

Кроме того, на разных этапах нагружения, задавая $2\mu v_1$ для задач (1) или (2) и используя экспериментальное значение *E*, формулируя наиболее правдоподобные предположения на поведение $\tau_0(x)$ или $u_0(x)$, вычисляем f(a). Варьируя значениями $\tau_0(x)$ и $u_0(x)$, в задачах (1) и (2) стремимся достичь наилучшего совпадения с фиксируемой величиной f(a).

Рассматриваемый математический эксперимент по нагружению области Ω дает возможность найти смещения на Γ_2 и Γ_4 . Пусть это будут значения u(a,h) и u(a,h/2). Первое из них существенно зависит от условий на контакте и может использоваться для их уточнения, а второе позволит оценить коэффициент Пуассона. Наибольшие деформации Γ_2 и Γ_4 достигаются в окрестности $x = \pm a$ и могут стать местом начала разрушения. В общем случае, на разрушение влияет как геометрия образца, контактные условия, так и структура материала; каждый из этих параметров может стать определяющим [7].

Получены уравнения, с помощью которых вычисляются компоненты напряжений и смещений для трех основных задач теории упругости, моделирующих деформирование отдельного блока или образца пород при лабораторных испытаниях. Приводятся примеры их численной реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Опарин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики. // ФТПРПИ. – Ч. I. – 1999. – № 3; Ч. II. – 2000. – № 4.– С. 3-19.

2. Опарин В.Н., Балмашева Е.Г., Востриков В.И. О динамическом поведении напряженных блочных сред. Ч. 2. // ФТПРПИ. – 2001. – № 5. – С. 3-22.

3. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды. // ФТПРПИ. – 1998. – № 5. – С. 3-24.

4. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966 – 707 с.

5. Грицко Г. И., Власенко Б. В. Прогнозирование и расчет проявлений горного давления. – Новосибирск: Наука. 1980 – 214 с.

6. Миренков В. Е., Шутов В. А. Аналитические вопросы механики разрушения. – Новосибирск: Изд-во НАРХИ. 1996 – 217 с.

7. Юшкин В. Ф., Опарин В. Н., Жигалкин В. М. и др. Особенности разрушения одномерной модели блочных сред при длительном одноосном нагружении. // ФТПРПИ. – 2002. – № 4. – С. 3-24.

© В. Е. Миренков, А. А. Красновский, 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩА В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Лариса Алексеевна Назарова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заведующая отделом горного породоведения, тел. (383)217-24-46, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Нелли Александровна Мирошниченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Мураталы Джузумалиевич Джаманбаев

Кыргызский государственный технический университет им. И. Р. Раззакова, 720044, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Мира, 66, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика», e-mail: jamanbaev@mail.ru

Для исследования фильтрационных процессов и температурного режима в окрестности ограждающей дамбы хранилища жидких отходов горного производства, расположенного в криолитозоне, разработана конечноэлементная термогидродинамическая модель. Получена оценка влияния размеров защитного экрана на объем проникающего через дамбу флюида. Выявлен параметр, позволяющий своевременно обнаружить нарушение целостности противофильтрационного экрана.

Ключевые слова: конечноэлементная модель, тепломассоперенос, защитная дамба, мерзлые и талые породы, противофильтрационный экран.

HEAT AND MASS TRANSFER IN THE TAILINGS DAM IN THE PERMAFROST ZONE

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, Head of Department for Science of Rocks, tel. (383)217-24-46, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Leonid A. Nazarov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, Head of Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Nelli A. Miroshnichenko

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

Murataly D. Jamanbaev

Razzakov Kyrgyz State Technical University, 720044, Kyrgyzstan, Bishkek, 66 Prospect Mira, Dr Phys-Math, Head of Applied Mathematics and Information Science Department, tel. (0312)46-14-53, e-mail: jamanbaev@mail.ru

For the analysis of fluid flows and temperature behavior in the area of dam of liquid mining waste storage in the permafrost zone, the authors have developed the finite element thermalhydrodynamic model. The influence of the impervious screen dimension on the amount of fluid flow in the dam body is estimated. The authors reveal the criterion for timely detection of the impervious screen rupture.

Key words: finite element model, heat and mass transfer, protection embankment, frozen and thawed rocks, screen.

Хранилища отходов обогащения руд относятся к наиболее опасным источникам техногенного воздействия на окружающую среду. Масштабы их влияния на прилегающие территории особенно опасны в криолитозоне, что связано с нарушением природного теплового режима, оттаиванием мерзлых грунтов и появлением новых путей миграции флюидов, снижением статической устойчивости ограждающих конструкций и загрязнением поверхностных и подземных вод. Вопросы моделирования процессов тепломассопереноса для объектов, расположенных в районах распространения вечной мерзлоты, рассматриваются, например, в [1–4].

В настоящей работе исследуется температурно-фильтрационный режим техногенного объекта – ограждающей дамбы хранилища жидких отходов на примере рудника Кумтор (Кыргызстан); проанализированы варианты возникновения и развития различных горнотехнических ситуаций.

Защитная дамба имеет форму неравнобедренной трапеции высотой h и основанием L, расположенной на многолетнемерзлых породах с постоянной температурой $T_p < 0$ на глубине залегания нейтрального слоя z=Z (рис. 1). В момент времени t = 0 до отметки $h - z_w$ хранилище наполняется жидкими промышленными отходами с постоянной температурой T_w вследствие непрерывности производственного цикла.

На дневной поверхности $A_3A_4...A_7$ давление P = 0 и задано сезонное изменение температуры $T = T_s(t)$ со среднегодовым значением T_s . На участке $A_1A_2A_4$ смонтирован противофильтрационный экран, так что нормальная составляющая скорости флюида равна нулю, а $T = T_w$. На вертикальных границах x = 0, X по условиям симметрии отсутствует тепловой поток ($q_x = 0$) и движение флюида в горизонтальном направлении ($v_x = 0$).



Рис. 1. Схема объекта, фрагмент сетки конечных элементов и граничные условия

Требуется описать изменение температуры в грунтовом массиве и теле дамбы, а также гидродинамические процессы в талой зоне, вызванные перепадом давления. Поскольку протяженность объекта в направлении y намного превышает его линейные размеры, а конфигурации сечений y = const одинаковы, данную краевую задачу можно рассматривать в плоской постановке в декартовой системе координат (x, z).

Эволюция температуры описывается нестационарным уравнением теплопроводности с конвективными членами [5]

$$T_t + \vartheta \cdot \nabla T = \nabla \cdot \left(a(T) \nabla T \right), \tag{1}$$

где $v = (v_x, v_z)$ – скорость движения флюида, a – коэффициент температуропроводности.

Давление *Р* и скорость *V* находятся из уравнений теории фильтрации [6]

$$P_t = \nabla \cdot (b(T)\nabla P), \tag{2}$$

$$\dot{V} = -\frac{b(T)}{P_0} \nabla P \,, \tag{3}$$

где b – коэффициент фильтрации, P_0 – атмосферное давление. Движение флюидов при этом происходит только в талой зоне, где T > 0.

Нелинейная система уравнений (1) – (3) с начальными $T(0, x, z) = T_p$, P(0, x, z) = 0 и описанными выше граничными условиями (рис. 1) решалась методом конечных элементов [7] с шагом дискретизации по пространству – 1 м, по времени – 1 сутки. Расчеты проводились при следующих значениях параметров модели: X = 400 м, Z = 80 м, $z_w = 30$ м, h = 40 м, L = 130 м, $T_p = -1^{\circ}$ С, $T_w = 8^{\circ}$ С, $T_s = 5.6^{\circ}$ С, $P_w = \rho_w g z_w$, $\rho_w = 1050$ кг/м³ – плотность флюидов, g – ускорение свободного падения, коэффициенты a и b (величина b соответству- ет низкопроницаемым глинам [8,9]) приведены в таблице.

На рис. 2 отображены последовательные положения нулевой изотермы среднегодовых температур, разделяющие талую и мерзлую зоны. Поскольку T_s

положительная, то эта изотерма, постепенно удаляясь от дневной поверхности, через 10–15 лет достигает стационарного положения (при неизменных теплофизических параметрах среды и внешних условиях).

Таблица



Значения коэффициентов температуропроводности и фильтрации



Рис. 2. Положение нулевой изотермы в различные моменты времени

На рис. 3 темными линиями показаны изобары давления P/P_0 при t = 5 лет и l = 0, где l – протяженность горизонтального участка A_1A_2 защитного экрана (рис. 1). Можно заметить, что за этот промежуток времени поток флюида почти достиг гребня и противоположного откоса дамбы.



Рис. 3. Изолинии давления через 5 лет после заполнения хранилища

Для анализа безопасности экологической ситуации представляет интерес сравнительная оценка объема проникшего через дамбу флюида при различных размерах противофильтрационного экрана

$$V(t) = W \int_{0}^{t} \int_{C} v \cdot h \, dC \, ,$$

где W – протяженность дамбы в направлении y, h – нормаль к дневной поверхности, C – контур $A_4A_5A_6A_7$ (рис. 1). На рис. 4 для различных l сплошными линиями показано распределение величины V(t), отнесенное к ее значению при t = 10 лет, l = 0. Видно, что увеличение горизонтального участка l экрана от 0 до 10 м существенно снижает объем фильтрата.



Рис. 4. Объем флюида, проникшего через дамбу, при различных значениях *l*

По результатам численных экспериментов было установлено, что на величину V практически не влияет изменение температуры T_w в диапазоне 4–8°С. В то же время V существенно уменьшается при снижении среднегодовой температуры T_s за счет увеличения периода отрицательных температур и, как следствие, более длительного сохранения непроницаемого мерзлого слоя на поверхности откоса дамбы.

Проанализируем, как изменятся характеристики фильтрационного процесса, если в некоторый момент времени $t = t_h$ на глубине $h - z_h$ в противофильтрационном экране возникнет отверстие размером l_h . На рис. 3 серыми линиями показаны изобары давления в момент времени t = 5 лет при $t_h = 4$ года, $l_h = 2$ м и $z_h = 15$ м. Отчетливо видно резкое повышение давления в окрестности отверстия и дневной поверхности. Следствием этого является увеличение объема V (штриховая линия на рис. 4), хотя размер отверстия значительно меньше геометрических параметров дамбы.

Пусть теперь мы имеем вертикальную наблюдательную скважину для мониторинга давления с гребня дамбы (рис. 3). На рис. 5 показана вариация давления $P_h(t, z)$ на отметках z = 3 и 12 м: сплошные линии – противофильтрационный экран не нарушен; штриховые – отверстие расположено на глубине $z_h = 15$ м; штрихпунктирные – $z_h = 20$ м.



Рис. 5. Давление в наблюдательной скважине при различном положении отверстия в противофильтрационном экране

Возникновение отверстия в экране проявляется в показаниях датчиков давления уже через 4–6 месяцев, и чем ближе оно к точке измерения, тем более резко возрастает угол наклона $\alpha(z)$ кривых $P = P_h(t, z)$. Таким образом, поведение параметра α на разной глубине может служить не только индикатором целостности противофильтрационного экрана, но даже указать местоположение отверстия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 14–05–90116).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shen M., Konrad J.-M. Dam construction in northern environment: a numerical study // Cold Regions Engineering. / Proceedings of the Eighth International Conference on Cold Regions Engineering. Fairbanks, Alaska, August 12-16, 1996. – pp. 724–735.

2. Li D.Q., Huang X., Ming F., Liu J.K. Influence of slope angle on thermal stability of embankment in permafrost regions. // WCE 2013. Proceedings of the World Congress on Engineering. London, UK, July 3–5, 2013. Vol.1 – pp. 161–166.

3. Ma W., Qi J.L., Wu Q.B. Analysis of the deformation of embankments on the Qinghai-Tibet Railway. // Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering. – 2008. – Vol. 134, no. 11. – pp. 1645–1654.

4. Стетюха В.А. Особенности моделирования тепломассопереноса в условиях распространения высокотемпературных многолетнемерзлых пород. // ГИАБ. – 2009. – № 3. – С. 293–297.

5. Гончаров С.А. Термодинамика. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 440 с.

6. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. – М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-механическом факультете МГУ, 2009. – 88 с.

7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 543 с.

8. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. – М.: Стройиздат, 1973.

9. Грунты. Классификация. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 25100-2011. – М.: Стандартинформ, 2013. – 42 с.

© Л. А. Назарова, Л. А. Назаров, Н. А. Мирошниченко, М. Д. Джаманбаев, 2015

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ: РАСЧЕТ ДЛЯ ОДИНОЧНОЙ ПОРЫ И ДЛЯ АНСАМБЛЯ ПОР

Михаил Михайлович Немирович-Данченко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, профессор кафедры геофизики, e-mail: michnd@mail.ru

Александра Андреевна Шатская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, ассистент кафедры геофизики, e-mail: shatsaa@mail.ru

В работе на основе численного моделирования рассмотрено влияние пористой среды на сейсмическое поле для случая одиночной поры и ансамбля пор. Обработка результатов численного моделирования позволила оценить средние скорости и сопоставить их с данными физического моделирования. Показано, что расчеты в целом дают хорошее качественное и количественное соответствие результатов.

Ключевые слова: пористые среды, сейсмические волны, численное моделирование.

MODELLING OF THE SEISMIC FIELD IN THE POROUS ENVIRONMENT: CALCULATION FOR THE SINGLE TIME AND FOR ENSEMBLE OF THE TIME

Mikhail M. Nemirovich-Danchenko

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, 30 Lenin Avenue, Department of Geophysics, professor, e-mail: michnd@mail.ru

Alexandra A. Shatskaya

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, 30 Lenin Avenue, Department of Geophysics, assistant, e-mail: shatsaa@mail.ru

In work on the basis of numerical modeling influence of the porous environment on a seismic field for a case of a single time and ensemble of a time is considered. Processing of results of numerical modeling allowed to estimate average speeds and to compare them with data of physical modeling. It is shown that in general dismiss good qualitative and quantitative compliance of results.

Key words: porous media, seismic waves, numerical simulation.

Интерес к пористым средам и их поведению в сейсмических волнах не ослабевает уже несколько десятилетий. Для моделирования сейсмических волн в пористых средах развиваются лабораторные и численные методы. При физическом моделировании в качестве материала скелета используются несколько видов твердых тел, например, алюминий [1, 2], натриево-известковое стекло (Soda-lime glass) [3]. Численные подходы позволяют, как правило, довольно легко менять свойства модели, но их использование требует калибровки результатов, как качественной, в смысле адекватного описания физических явлений, наблюдаемых в лабораторных экспериментах, так и количественной – при

определении размерных значений вычисляемых величин. В предлагаемой работе нами применяется явная условно-устойчивая схема второго порядка [4] позволяющая при использовании ряда усовершенствований [5] проводить расчеты для большого числа длин волн. Этот подход был успешно применен для обнаружения множественной трещиноватости по спектру волнового поля [6].

Было рассмотрено влияние одиночной поры на проходящую сейсмическую волну. Одна из недавних работ [7] посвящена расчету дифракции сейсмического поля на одиночной поре для различных частот. На рис. 1 приведен срез изображения образца карбонатной породы (рис. 7 из [7]). Ими приводится также упрощенная матрица упругих свойств для проведения расчетов (рис. 2).



dolomite

Рис. 1. Срез изображения карбонатной породы (рис. 7 из [7])



Рис. 2. Матрица скоростей продолных волн в образце, м/с (рис. 8 из [7]).

Расчеты авторами [7] проводились для частот 100 Гц и 1000 Гц. Нами расчеты проводились для нескольких частот. На рис. 3 приводится сравнение нашего расчета и результата работы [7] для сравнимых длин волн.



Рис. 3. Сравнение результатов расчета дифракции: справа – наш расчет, слева – рис. 10 из работы [7]

Нами выбиралось монохроматическое воздействие, на рис. 3 хорошо виден цуг волн проходящего через пору волнового пакета. Видно, что пора в обоих случаях насыщена короткопериодными колебаниями, берега поры отчетливо «прорисованы» сейсмическим полем. Это позволяет сделать вывод о хорошем качественном соответствии результатов, полученных конечно-разностным моделированием (настоящая работа) и с использованием нейронных сетей [7].

Для количественной проверки работы алгоритма расчета распространения упругих волн в пористой среде было выполнено решение задачи, для которой есть экспериментальные данные [2]. В описанном эксперименте приводится мезоструктура спеченного алюминия с пористостью 9 % и 17 %.

Размер поры порядка 20×10^{-6} м, частота акустического сигнала 5МГц, длина волны $\approx 0,1$ см. Таким образом, размер поры всего в 50 раз меньше длины волны, такие поры можно описывать несколькими расчетными ячейками. По экспериментальным результатам авторов статьи [2] для алюминия с пористостью 9% средняя скорость распространения продольной волны получилась равной $V_p = 5125$ м/с; для пористости 17% $V_p = 4120$ м/с.

Было выполнено численное моделирование распространения продольной плоской волны для таких значений пористости. В процессе моделирования средняя скорость распространения продольной волны определялась по наклону годографа. Так как в среде скелет сухой, то считалось, что поры заполнены воздухом $k^{air} = 0.00014 \Gamma \Pi a$, $\rho^{air} = 1.2 \ \kappa \Gamma / M^3$.

На рис. 4 приведены численные снимки сейсмического поля во всей модели для двух моментов времени. Для момента времени 40 мс видно, что фронт падающей волны достиг пористой части модели, а для времени 60 мс волна распространилась вглубь расчетной области. Хорошо виден результат ансамблевой дифракции на отдельных порах.



Рис. 4. Скрин-шот слева соответствует моменту времени 40 мс, справа – 60 мс

В расчетах были получены следующие значения: при пористости 9% значение скорости продольной волны V_p =5123 м/с, а при пористости 17 % значение скорости продольной волны V_p =4074м/с.

Таким образом, при численном моделировании значения скоростей в пористом алюминии, полученные по описанной выше методике, отличались от скоростей из эксперимента при пористости 9% всего на 0,04 %; а при пористости 17 % отличие составило 1,1 %.

Итак, в работе на основе численного моделирования рассмотрено влияние пористой среды на сейсмическое поле для случая одиночной поры и ансамбля пор. Расчеты для одиночной поры вполне сопоставимы с имеющимися опубликованными результатами других авторов. Для модели пористой среды обработка результатов численного моделирования позволила оценить средние скорости и сопоставить их с данными физического моделирования. Показано, что расчеты в целом дают хорошее качественное (для одиночной поры) и количественное (для ансамбля пор) соответствие результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pyrak-Nolte L.J. Fracture anisotropy: the role of fracture-stiffness gradients // The Leading Edge — 2007. — V. 26. — $N_{2}9$. — P. 1124–1127.

2. Bonnan S., Hereil P-L., Collombet F. Experimental characterization of quasi static and shock wave behavior of porous aluminum // Journal of applied physics. - 1998. - V. 83. - No. 11. -P. 5741-5749.

3. Xun Li, Lirong Zhong, Laura J Pyrak-Nolte. Physics of Partially Saturated Porous Media: Residual Saturation and Seismic-Wave Propagation, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2001. 29:419–60 p 419-460

4. Немирович-Данченко М.М., Стефанов Ю.П. Применение конечно-разностного метода в переменных Лагранжа для численного расчета волновых полей в сложнопостроенных средах// Геология и геофизика. - № 11. - 1995. - С. 96-105

5. Мельникова Н.А., Немирович-Данченко М.М. Методика расчета упругих волновых полей для мезообъема, содержащего несколько разноориентированных кристаллов с различными свойствами // Физ. мезомех. -2006. -Т. 9. -№ 1. -С. 103-110.

6. Немирович-Данченко М.М. Возможности обнаружения множественной трещиноватости сплошной среды на основе оценки спектральной плотности энергии отраженного сигнала // Физ. мезомех. - 2013. - Т. 16. - № 1. - С. 105-110

7. Bagus Endar B. Nurhandoko, Pongga Dikdya Wardaya, John Adler, and Kisko R. Siahaan Seismic wave propagation modeling in porous media for various frequencies: A case study in carbonate rock Citation: AIP Conference Proceedings 1454, 109 (2012); doi: 10.1063/1.4730699

© М. М. Немирович-Данченко, А. А. Шатская, 2015

ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ВИНТОВЫХ НАСОСОВ ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ ПРОМЫСЛОВОГО СБОРА И ТРАНСПОРТА НЕФТИ

Азат Альбертович Нургалиев

Нефтегазодобывающее управление «Ямашнефть» Открытого Акционерного общества «Татнефть», 423450, Россия, г. Альметьевск, ул. Чапаева, 4а-42, начальник ЦДНГ-2, тел. (917)391-07-47, e-mail: naa@tatneft.ru.

Ленар Тависович Хабибуллин

ОАО «Татойлгаз», 423450, Россия, г. Альметьевск, ул. Тимирязева, 17, главный специалист по ремонту скважин, тел. (917)266-55-40, e-mail: linarrt@tatoilgas.ru

С 2013 года на объектах НГДУ «Ямашнефть» началась реализация программы по внедрению объемных винтовых насосных установок производства ООО «ПермИнженирингГрупп». Целью данной программы является снижение затрат на потребляемую электроэнергию и обеспечение равномерного поступления сырья. Предлагаемая насосная установка, относится к машинам объемного (гидростатического) действия, применение которой позволяет осуществлять процесс перекачивания жидкости с низкой частотой вращения приводного вала, обладают хорошими рабочими характеристиками (в том числе по энергопотреблению).

Ключевые слова: объемные винтовые насосы, снижение затрат на электроэнергию, обеспечение равномерного поступления сырья.

ASSESSMENT OF POSITIVE DISPLACEMENT SCREW PUMPS IN THE SYSTEM OF FIELD GATHERING AND TRANSPORTATION OF OIL

Azat A. Nurgaliev

Yamashneft Oil and Gas Production, TATNEFT Group, 423450, Russia, Almetyevsk, 4a Chapaeva St., Apt. 42, Head of TSDNG-2, tel. (917)391-07-47, e-mail: naa@tatneft.ru

Lenar T. Khabibullin

Tatoilgaz JSC, 423450, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, 17 Timiryazeva St., Apt. 65, Chief Well Repairman, tel. (917)266-55-40, e-mail: linarrt@tatoilgas.ru

Since 2013 Yamashneft company has been implementing program on introduction of volumetric screw pump units manufactured by PermEngineeringGroup Ltd into service. The program is aimed at reduction of electric power cost and provision of consistent raw material supply. The discussed pump unit is a hydrostatic positive displacement machine that performs pumping at low drive shaft speed and possesses good performance data (including power consumption).

Key words: positive displacement screw pumps, power cost reduction, consistent raw material supply.

В НГДУ «Ямашнефть» существующая система сбора, предварительной подготовки и перекачки нефти представляет собой сложнейшую сеть технологических объектов, аппаратов и трубопроводов. Одной из задач, которая сегодня стоит перед специалистами - это организации слаженной работы всей системы, учитывая все особенности технологических характеристик от отдельно взятых ГЗНУ до объектов подготовки нефти ДНС и УПВСН.

Добыча нефти не может рассматриваться как отдельный обособленный процесс, влияние различных факторов и свойств продукции на дальнейшую подготовку нефти должны учитываться. Физико-химические свойства реагентов применяемых в методах увеличения нефтеотдачи, совместимость различных деэмульгаторов и ингибиторов коррозии, равномерность поступления продукции на объекты подготовки нефти – все это важнейшие факторы, влияющие на качество подготовки нефти и сточной воды. Успешное решение проблемы подготовки нефти тесно связано с особенностями процессов перекачки нефти по трубопроводам.

Неравномерность поступления сырья приводит к сокращению времени отстоя в период максимального поступления, в результате обводненная продукция поступает в товарные резервуары. Как мы видим из представленной диаграммы, обводненность поступающего сырья за январь месяц 2014 года доходила до 3%, увеличение обводненности происходит за счет неравномерного поступления на объекты подготовки нефти.

Это связано с использованием в качестве агрегатов для перекачки насосов ЦНС. При организации перекачки насосами ЦНС откачка жидкости производится периодически, по мере наполнения буллитов на ГЗНУ, что негативно влияет на процесс подготовки нефти.

Центробежные насосы секционного типа применяются для перекачки нефти и нефтепродуктов в процессе их транспортировки с промысловых объектов групповой замерной насосной установки (ГЗНУ) на дожимную насосную станцию (ДНС) и, далее, до конечного пункта сдачи товарной нефти.

Они относятся к машинам динамического принципа действия, которые преобразуют энергию привода в кинетическую энергию жидкости путем ее ускорения к наружному ободу рабочего колеса. Отрицательным влиянием использования данного типа насоса является высокое потребление электроэнергии, вследствие низкого КПД, а также пульсация давления в трубопроводе, изза частого цикла остановок и запусков ЦНС.

Для решения выше обозначенных вопросов с 2013 года на объектах НГДУ «Ямашнефть» началось осуществление программы по внедрению объемных винтовых насосных установок производства ООО «ПермИнженирингГрупп». Целью данной программы является снижение затрат на потребляемую электроэнергию и обеспечение равномерного поступления сырья.

Предлагаемая насосная установка, относится к машинам объемного (гидростатического) действия, применение которой позволяет осуществлять процесс перекачивания жидкости с низкой частотой вращения приводного вала, обладают хорошими рабочими характеристиками (в том числе по энергопотреблению).

Устройство, создающее гидравлическую мощность в данной установке это винтовая секция, состоящая из статора и ротора. В целом насосная установка

состоит из следующих основных узлов: рама, шпиндель, электродвигатель, редуктор, насосная секция, муфта, кожух, клапан обратный.

В нефтяной промышленности насосы применяются для перекачки: чистой или загрязненной абразивом нефти, водно-газо-нефтяных смесей обычной и высокой вязкости, мазута, пластовой воды, дренажных вод, буровых растворов

Преимущества насосов объемного действия:

- бережное перекачивание жидкости, не разрушающее структуру продукта;

- возможность перекачивания высоковязких жидкостей;

- низкий уровень удельной нормы расхода электроэнергии;

- выравнивание графика нагрузки, а так же объема перекачки нефти;

- снижение давления в нефтепроводах.

При сравнении их с насосами ЦНС при меньшей мощности эл. двигателя и частоте вращения, они обладают схожими характеристиками по объему перекачки и напору, при этом КПД выше на 46%.

Пусконаладка УВН состоит из проведения гидравлической обвязки, подключении электрической части (силовой и КИП), отладки логической схемы управления. Гидравлическая обвязка – установка и закрепление насоса на фундаменте, подведение напорной и всасывающей магистралей в соответствии с проектом. Подключение силовой части – подключение СУ к ТП, эл. двигателю насоса и установка заземления. Подключение КИП – подключение управляющего и предохранительного датчиков к станции правления и их заземление. Логическая схема управления настраивается с помощью станции управления по алгоритму поддержания давления на приеме насоса или уровня жидкости в буллите в период пуска и ввода насоса в эксплуатацию.

В нашем управлении составлена поэтапная программа внедрения насосов объемного действия.

На сегодняшний день практически завершены I и II этапы программы. Винтовые насосы внедрены и успешно работают на 11-ти объектах НГДУ.

В июле 2014г. введены в эксплуатацию винтовые насосы на 3-х объектах, к концу 2014г. запланирован ввод в эксплуатацию винтового насоса на объекте ГЗНУ-206.

Охват объектов винтовыми насосами объемного действия в 2014г. составит: 100% по объектам нефтедобычи и 25% по объектам подготовки и перекачки нефти. В целом по НГДУ объем внедрения составит - 80%.

Обеспечение непрерывной перекачки жидкости с ГЗНУ на ДНС имеет следующие преимущества:

Во-первых, снижение давления на 52 %, чем при использовании ЦНС. Данный факт позволяет снизить вероятность порывов на нефтепроводах и увеличить время их эксплуатации, что в свою очередь поспособствует уменьшению затрат на устранение последствий после порывов и восстановление их работоспособности.

Во-вторых, данные мероприятия позволяют снизить потребление электроэнергии на транспортировку нефти внутри подразделения. Так, при 100 % внедрении винтовых насосных установок объемного действия на всех ГЗНУ и ДНС расчётно подтверждено снижение удельного энергопотребления перекачиваемой жидкости на 49%.

Для завершения программы внедрения насосов объемного действия необходимо реализовать III этап внедрения. Завершение программы внедрения винтовых насосных установок позволит осуществить полный переход в режим постоянной перекачки продукции скважин, обеспечить равномерность поступления сырья и оптимизировать процесс предварительной подготовки нефти на всех объектах НГДУ.

На основе полученных данных по снижению удельного потребления электроэнергии винтовых насосов объемного действия в сравнении с ЦНС, произведен расчет экономической эффективности внедрения УВН на всех объектах управления.

Общий объем инвестиций составляет 66 млн.рублей, в том числе стоимость оборудования 58 млн.руб., ЧДД составит 82 072 т.р., индекс доходности инвестиций – 2,24 д.ед., срок окупаемости вложенных инвестиций составит 3,7 года. Расчет эффективности внедрения винтовых насосов производился в сравнении с ЦНС, с учетом последующего содержания 1 резервного ЦНС без операторского обслуживания.

После проведенного анализа комплексных мероприятий на примере рассмотренных объектов видно, что внедрение винтовых насосных установок объемного действия позволяет решить ряд вопросов, которые позволяют вести процесс добычи и транспортировки нефти более энергоэффективным способом, это:

1. Осуществлять непрерывную транспортировку и перекачку продукции скважин;

2. Снижать абсолютные значения электропотребления, в том числе пиковые нагрузки в часы контроля мощности;

3. За счет применения ЧРЭП регулировать при необходимости параметры работы насосных агрегатов по производительности;

4. Исключить переменные нагрузки на трубопроводы со снижением абсолютных максимальных величин рабочих давлений практически в 2 раза;

5. За счет уменьшения давления в нефтепроводе ожидается и снижение количества порывов трубопровода на 15÷20%;

6. За счет снижения электропотребления на 70% обеспечение снижения затрат на 8,5%;

7. Срок окупаемости составляет 4,5÷5,5 лет.

Ниже для информации в табл. 1,2 приведены данные о сравнительных технологических показателях работы ЦНС и винтовых насосов объемного типа, а также экономические показатели об их эксплуатации.

Таблица 1

Сравнительные технологические показатели работы	
ЦНС и винтовых насосов объемного типа (на 30.06.2014 г.))

№ п/п	Объект	Марка насоса		Наработка общая на час/сут	Давление на вых., атм.		% сниже- ния давле- ния в сравнении с ЦНС	Удельн. рас- ход, э/э кВт.ч/м3		% сниже- ния уд. расхода э/э в сравне- нии с ЦНС
		ЦНС	УВН		до	по- сле		до	после	
1	ГЗНУ-556	ЦНС-38x220	УВН-30/10	6517 / 272	22	8	64%	1,2	0,86	30%
2	ГЗНУ-10	ЦНС-60х330	УВН-30/25	6375/ 267	23	18	22%	1,4	1,02	29%
3	ДНС-8	ЦНС-60х330	УВН55/25	5539 / 231	15	7	53%	1,08	0,30	71%
4	ГЗНУ-110	ЦНС 38х220	УВН-22/16	1294 / 54	19	7	63%	1.1	0,49	48%
5	ДНС-6	ЦНС 60х198	УВН-35/16	2367 / 99	12,6	6	52%	1,0	0,57	44%
6	ДНС-26	ЦНС 60х330	УВН-35/16	2504 / 104	23	5	78%	1,4	0,71	48%
7	ГЗНУ-607	ЦНС 60x330	УВН-22/16	1456 / 61	23	9	61%	1,4	0,49	63%
8	ГЗНУ-4304	ЦНС-60х330	NETCH	19104/796	12	10	16%	1,18	0,55	53%
Итого:				19	9	52%	1,22	0,62	49%	

Таблица 2

Сравнительные экономические показатели эксплуатации ЦНС и винтовых насосов объемного действия (на 30.06.2014 г.)

No		Марка	насоса	Экономия э/э, за	Экономия затрат по
л⊴ п/п	Объект	UHC	VBH	период	э/э за период экспл.,
		цис	<i>3</i> D11	экспл. кВт.ч	т.руб.
1	ГЗНУ-556	ЦНС-38х220	УВН-30/10	20684	44
2	ГЗНУ-10	ЦНС-60х330	УВН-30/25	59236	127
3	ДНС-8	ЦНС-60х330	YBH55/25	122323	263
4	ГЗНУ-110	ЦНС 38x220	УВН-22/16	48776	105
5	ДНC-6	ЦНС 60х198	УВН-35/16	27916	60
6	ДHC-26	ЦНС 60x330	УВН-35/16	51206	110
7	ГЗНУ-607	ЦНС 60x330	УВН-22/16	21168	46
8	ГЗНУ-4304	ЦНС-60х330	NETCH	391835	842
		Итого:	601788	1 598	

© А. А. Нургалиев, Л. Т. Хабибуллин, 2015

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРЭ НА МЕЛКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЮГО-ВОСТОКА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Азат Альбертович Нургалиев

Нефтегазодобывающее управление «Ямашнефть» Открытого Акционерного общества «Татнефть», 423450, Россия, г. Альметьевск, ул. Чапаева, 4а-42, начальник ЦДНГ-2, тел. (917)391-07-47, e-mail: naa@tatneft.ru.

Ленар Тависович Хабибуллин

ОАО «Татойлгаз», 423450, Россия, г. Альметьевск, ул. Тимирязева, 17, главный специалист по ремонту скважин, тел. (917)266-55-40, e-mail: linarrt@tatoilgas.ru

С 2005 на мелких месторождениях юго-востока республики Татарстан идёт широкое применение технологии одновременно-раздельной эксплуатации скважин, этому способствовало развитие технологий внутрискважинных разобщителей (пакеров). За прошедший период времени за счёт применения технологии на данных объектах добыто более одного миллиона тонн нефти, её применение дало значительный экономический эффект. Технология ОРЭ имеет более 50 схем применения, их использование зависит от технических и геологических условий эксплуатации скважины.

Ключевые слова: технология одновременно-раздельной эксплуатации скважин, внутрискважинные разобщители, схем применения ОРЭ.

ANALYSIS OF SIMULTANEOUS-SEPARATE OPERATION EFFICIENCY AT SMALL RESERVOIRS IN THE SOUTH-EAST TATARSTAN

Azat A. Nurgaliev

Yamashneft Oil and Gas Production, TATNEFT Group, 423450, Russia, Almetyevsk, 4a Chapaeva St., Apt. 42, Head of TSDNG-2, tel. (917)391-07-47, e-mail: naa@tatneft.ru

Lenar T. Khabibullin

Tatoilgaz JSC, 423450, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, 17 Timiryazeva St., Apt. 65, Chief Well Repairman, tel. (917)266-55-40, e-mail: linarrt@tatoilgas.ru

Since 2005 development of small reservoirs in the South-East Tatarstan has widely been applying the simultaneous–separate operation (SSO) technology backed up with the advanced technologies of uncoupling (packer assemblies). In the intervening years, SSO technology has produced over a million of tones of oil at the appreciable economic effect. SSO technology uses more than 50 flow charts selected based on geological and technical conditions of well operation.

Key words: simultaneous-separate operation technology, well uncouplers, SSO flow charts.

В промышленной разработке НГДУ "Ямашнефть" находятся 9 месторождений, которые характеризуются небольшими размерами, трудно извлекаемыми запасами, низкой продуктивностью, зональной и послойной неоднородностью пластов.

Динамику добычи нефти и обводненности за период становления и развития НГДУ «Ямашнефть» можно разбить на три этапа. І и ІІ этапы характеризуются активным вводом в разработку новых месторождений. В этот период на базе месторождений НГДУ «Ямашнефть» были образованы НГДУ «Нурлатнефть» и «Заинскнефть». Ш этап характеризуется доразбуриванием существующих месторождений, оптимизацией системы разработки карбонатных отложений.

За последние 15 лет с баланса НГДУ были переданы 3 месторождения для создания МНК с суммарной годовой добычей 130 тыс.т.

Учитывая, что на III этапе мы были территориально ограничены, и, открытие новых месторождений не предвиделось, то увеличение объемов добычи нефти возможно было только при вовлечении в разработку запасов по всей вертикали геологического разреза.

Все вышесказанное подтолкнуло нас первыми испытать технологию ОРЭ в 2003 году на скважине №2046 Березовского месторождения. Количество внедренных установок ОРД сегодня составляет 238 скважин (18% от общего числа по ОАО «ТН», 19% от общей добычи). На слайде представлена фактическая добыча и прогнозная без внедрения ОРЭ.

Это позволило нам нарастить ежегодную добычу нефти на 168 тыс.тонн, а накопленную добычу довести на 01.07.2013г. до 866 тыс.тонн.

Масштабное применение в ОАО «ТН» установок ОРЭ, фонд скважин которых сегодня по ОАО «ТН» составляет 1269 скважин, еще раз доказывает преимущества данной технологии, к которым относятся:

- повышение рентабельности работы скважин за счет подключения в разработку дополнительных эксплуатационных объектов,

- сокращение объемов бурения за счет использования ствола одной скважины;

- организация системы разработки с одновременным отбором запасов из разных эксплуатационных объектов одной сеткой скважин.

Вопрос по поиску путей повышения рентабельности скважины для нас всегда был актуальным. В результате внедрения установок ОРД 33 скважины (или 14% от общего фонда ОРЭ) вышли из категории нерентабельных. 25 скважин из них на сегодня уже окупили понесенные затраты.

На участке Екатериновского месторождения по технологической схеме выделены четыре эксплуатационных объекта: верей – башкир, тула, бобрик и турней. В процессе разбуривания участка было принято решение ввести в разработку отложения бобриковского горизонта, как наиболее продуктивные.

Применив технологию ОРЭ, внедрили однолифтовые установки на 7 объектах. Общий прирост по 7-ми скважинам составил 37,1 т/сут. по нефти.

На Ерсубайкинском месторождении, применив технологию ОРЭ, успешно внедрили однолифтовые установки на турнейских скважинах № 4871 и 4873, приобщив бобриковский горизонт и получив суммарный прирост в 14,6 т/сут.

Благодаря комбинированию технологий ОРЭ и ОРЗ на Ямашинском месторождении, была реализована классическая схема разработки участка, включившая в себя как зону нагнетания, так и зону отбора. В скважинах № 2524, 2526, 2528, 2531, эксплуатировавших отложения турнейского яруса, был приобщен тульский горизонт. Суточный прирост в добыче по участку составил 11 тонн по нефти.

С целью поддержания пластового давления и компенсации отбора в тот же период в нагнетательной скважине № 2527н, через которую производилась закачка воды в турнейский пласт, был приобщен тульский горизонт и организована закачка по технологии ОРЗ.

Накопленная дополнительная добыча на данном участке по тульскому горизонту составила свыше 25 тыс. т. нефти.

Данный подход был применен и на соседних участках месторождения в районе нагнетательных скважин №7272, 11874, 1366.

Применив технологию ОРЭ на следующем участке Шегурчинского месторождения, приобщили тульский пласт в бобриковских скважинах № 1285, 4772, и внедрили однолифтовые установки, тем самым, существенно повысив охват по площади, производимой закачкой и, следовательно, эффективность самой закачки.

Накопленная дополнительная добыча на этом участке по тульскому горизонту составила 14 тыс.т., общий прирост – 10 т/сут. по нефти.

С февраля 2013г. на Архангельском месторождении начали применять нулевую ставку НДПИ на добычу высоковязкой нефти башкирского яруса. Обязательным условием при такой добыче является раздельный учет добываемой льготируемой нефти. И здесь установка ОРЭ стало незаменимым инструментом для решения данной задачи. Сохранив запасы по существующим объектам, мы ввели башкирский ярус в разработку путем внедрения двухлифтовых установок ОРД, ОРЗ и ОРДиЗ на 13 скважинах с суммарным приростом 40 т/сут.

Технологию ОРДиЗ можно назвать неординарным решением, раньше и представить не могли о совмещении одной скважиной двух назначений. Новые возможности применения установкам ОРЭ позволило запланировать внедрение в 2010 году технологию ОРДиЗ на добывающей скважине №10969 Ерсубайкинского месторождения для организации дополнительных очагов заводнения без дополнительных капитальных затрат на обустройство. На нагнетательной скважине №7297 приобщить башкирский ярус, тем самым увеличить выработку запасов по данному объекту.

Все новое специалистами НГДУ «Ямашнефть» всегда приветствовалось. Первая установка ОРД малого диаметра в АО «Татнефть» была внедрена на скважине №16502 Березовского месторождения в декабре 2012 года, которая позволила ввести в разработку западную часть залежи тульского горизонта, центральная часть которой уже эксплуатировалась установками ОРД. Прирост составил 4,9 т/сут.

В 2012 году на скважине №4752 была испытана первая установка для ОРЭ трех объектов. К разрабатываемым объектам турнейского и бобриковского горизонтов был приобщен башкирский ярус. Прирост составил 3,6т/сут.

Вышеназванные две технологии для нас на сегодняшний день очень актуальны, поскольку имеется фонд скважин для внедрения данных установок. Потенциальный фонд с малым диаметром составляет 13 скважин, и он из года в год будет расти с увеличением бурения.

Потенциальный фонд для внедрения ОРД 3-х пластов составляет 35 скважин.

Только расширение области применения технологии ОРД позволит нам и в дальнейшем вести рентабельную эксплуатацию скважин и залежей, обеспечивая поддержание пластового давления, раннего вовлечения в разработку запасов при сохранении существующей системы разработки, уплотнения скважин без дополнительного бурения, сокращения проектного фонда, создания очагов заводнения без дополнительных затрат.

© А. А. Нургалиев, Л. Т. Хабибуллин, 2015

КОМПЛЕСКНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФЛЮИДОРАЗРЫВА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Виктор Николаевич Опарин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий отделом экспериментальной геомеханики, тел. (383)217-07-74, e-mail: oparin@misd.nsc.ru

Владимир Иванович Востриков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией горной геофизики, тел. (383)217-00-01, e-mail: vvi49@mail.ru

Ольга Михайловна Усольцева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, руководитель ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Павел Александрович Цой

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; Новосибирский государственный технический университет, пр. Карла Маркса, 20, 630073, Россия, г. Новосибирск, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

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

Приводится исследование процесса деформирования и разрушения модели геосреды под воздействием флюидоразрыва с использованием трехизмерительных методик: спекл-метода измерения полей микродеформаций, метода акустической эмиссии, скоростной видеосъемки. Анализ синхронизированных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о существовании пространственно-временной взаимосвязи между физическими полями различной природы.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, геомеханическая модель, гидроразрыв, спекл-метода, сейсмический сигнал, микродеформации.

INTEGRATED ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF PHYSICAL FIELDS UNDER EFFECT OF FLUID FRACTURING. LABORATORY EXPERIMENT

Victor N. Oparin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Corresponding Member RAS, Dr Phys-Math, Head of Experimental Geomechanics Department, tel. (383)217-07-74, e-mail: oparin@misd.nsc.ru

Vladimir I. Vostrikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Head of Rock Geophysics Laboratory, tel. (383)217-00-01, e-mail: vvi49@mail.ru

Olga M. Usoltseva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Phys-Math, Executive Director of Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical and Geodynamic Measurements SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx prospect, Ph. D. Phys-Math, Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

The paper discusses the research into deformation and failure of a geomedium model under the effect of fluid fracturing using three measuring methods: speckle-method of microdeformation field measurement, acoustic emission and high-speed video filming. The analysis of synchronized experimental data allows a conclusion on the existence of time-spatial interconnection of various nature physical fields.

Key words: laboratory experiment, geomedium model, fluid fracturing, speckle-method, seismic signals, microdeformation.

Под действием критических нагрузок в твердых материалах развиваются процессы трещинообразования и нарушения сплошности, которые генерируют поля различной физической природы: деформационные, микросейсмической и электромагнитной эмиссии, температурные. Задача адекватного описания механического поведения различных геоматериалов, горных пород и их массивов под воздействием разных видов нагружения при подземном строительстве и добыче полезных ископаемых ведет к необходимости исследования проявления закономерностей этих полей, выявлению связей между ними, и, в конечном итоге, разработке новых оценочных параметров и критериев нарушения сплошности геосреды, которые могут быть применены для прогнозирования разрушения массивов горных пород (вывалы, горные удары, техногенные землетрясения).

Подавляющее большинство исследований ориентировано на изучение отдельных видов полей без увязки с другими, что ведет к неоднозначной оценке действия нарушения сплошности на геомеханическое состояние среды. В [1–5] развивается направление нелинейной акустики структурно-неоднородных сред, которое включает: экспериментальное исследование (в лабораторных и натурных условиях) нелинейных волновых процессов в микронеоднородных твердых телах; выявление физических механизмов сильной акустической нелинейности микронеоднородных сред и развитие их моделей (феноменологических, реологических, физических); развитие физических основ нелинейно-акустических методов неразрушающего контроля и диагностики структуры материалов.

В [6–8] представлены математические модели, приведен и проверен концентрационный критерий разрушения твердых тел в более крупных масштабах, в частности, для массивов горных пород. Ряд работ посвящен применению спекл–метода для исследования поля микродеформаций при разрушении геоматериалов [9–12]. В [9] обосновано применение спекл–фотографических методов для исследования деформирования и разрушения горных пород. В исследованиях [10] спекл–методом дан анализ поля деформаций в процессе нагружения до разрушения, показано, что оно является существенно неоднородным. В [11] приведен анализ полей компонент микродефодеформации в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях при испытаниях на одноосное и двухосное сжатие; введены сканирующие функции, на основании которых в дальнейшем определяются зоны разрушения.

В [12] рассмотрены испытания физической модели с предварительно ослабленными зонами, которая подвергалась двухосному неравнокомпонентному нагружению, с помощью спекл-метода подробно исследована эволюция поля микродеформаций. Наиболее близка к исследованию, описанному ниже, работа [13], в которой при нагружении образца с отверстием были проведены измерения микродеформаций с помощью спекл-метода, температуры (инфракрасным тепловизором).Одновременно регистрировалась акустическая эмиссия. Рассмотрены особенности развития этих полей на разных стадиях нагружения. Показано, что между ними существует хорошая пространственно-временная связь.

Таким образом, проблема адекватного описания геофизических процессов, происходящих в геоматериалах при нарушении его сплошности, определение закономерностей проявления физических полей и зависимостей между, ними является весьма актуальной.

Для этой цели в ИГД СО РАН был разработан и изготовлен испытательный стенд, позволяющий проводить комплексные измерения физических полей различной физической природы при моделировании флюидоразрыва в объекте, имитирующем геосреду. Измерительный комплекс обеспечивает синхронную регистрацию микродеформаций, микросейсмической и электромагнитной эмиссий, температурного поля и видеоизображений. При проведении эксперимента непрерывно измерялись поля микроперемещений на поверхности куба спекл-методом, микросейсмические сигналы регистрировались с помощью акселерометров системы "Pulse"КD 33. Одновременно производилась видеосъемка. Для регистрации температурного поля использовался компьютерный тепловизор ТКВр–ИФП "СВИТ". На рис. 1 представлена физическая модель на которой отрабатывалась методика проведения экспериментов, представляющая собой куб из оргстекла размерами 200х167х145 мм. В кубе выполнена полость для создания флюидоразрыва. В процессе эксперимента в полость с постоянной скоростью объемного расхода производилась подача вязкой среды (пластилина).



Рис. 1. Физическая модель геосреды после проведения эксперимента с флюидоразрывом

После проведения эксперимента был сделан анализ полученных результатов с позиций:

1. Эволюции во времени полей микродеформаций на боковой поверхности куба в области выхода трещины флюидоразрыва на его поверхность по мере прорастания трещины. Установлено, что поле микродеформаций на поверхности геосреды изменяется при приближении границы трещины к этой поверхности. Это означает, что регистрируя микродеформационное поле на поверхности, можно судить о деструктивных процессах, происходящих внутри наблюдаемого объекта.

2. Изменения во времени сигналов акустической эмиссии. Установлено, что в момент образования трещины регистрируется наибольший по амплитуде и частотному диапазону микросейсмический сигнал. Прорастание трещины происходит дискретно. При этом генерируются пакеты широкополосных по частоте микросейсмических сигналов. При выходе трещины на поверхность генерируется мощный низкочастотный сигнал.

3. Взаимосвязи указанных физических полей с процессом распространения трещины флюдоразрыва на основании видеосъемки.

На рис. 2 (а, в, д, ж) показаны снимки деформационного картирования отсканированной поверхности модели геосреды (область наблюдения спеклметодом на рис.1, развернутая на 90°) по компоненте деформации ε_z в продольном *z*-направлении образца. Уменьшению размера соответствует цвет, близкий к оттенкам темно-серого. Цвет, близкий к черному, соответствует нулевым деформациям. Положительным значениям (увеличению размера) соответствует цвет, близкий к оттенкам светло-серого,белый цвет – деформация, превышаюцая по модулю значение 0,007. На рис. 2 (б, г, е, з) приведены фотографии объекта геосреды в соответствующие рис. 2 (а, в, д, ж) моменты времени, темносерый цвет – зона флюидоразрыва. На рис. 2 зафиксированы моменты эксперимента, когда радиус зоны флюидооразрыва составлял *R*=0,2*l*; 0,35*l*; 0,65*l*; 0,9*l* (*l* – расстояние от центра полости до грани куба).

Анализ эволюции полей микродеформаций и распространения области флюидоразрыва по видеосъемке показал, что имеется достаточно хорошая корреляция между величиной и типом (удлинение, укорочение) микродеформаций ε_z в зависимости от распространения зоны флюидоразрыва. На рис. 2а (R=0,2l) поле микродеформаций ε_z , в основном, черного цвета, что говорит об их близких к нулю значениях. На рис. 2в (R=0,35l) преобладаетсветло-серый цвет, т.е. возникающиеплощади областей растяженияпревышают области сжатия; при R=0,65l (рис. 2д) вся средняя часть зоны наблюдения спекл-методом – светло-серого или белого цвета, в ней имеют место только микродеформацией ε_z значений 0,007. На рис. 2ж (R=0,9l) белая полоса в центре говорит о появлении зоны локализации микрофеформаций, значения которых существенно превышают средние по поверхности, это будущая область выхода трещины флюидоразрыва на поверхность куба.



Рис. 2. Снимки деформационного картирования отсканированной поверхности модели геосреды по компоненте деформации в продольном *z*-направлении образца (а, в, д, ж) и – фотографии объекта геосреды в соответствующие моменты времени:

(а, б) – радиус зоны флюидоразрыва составляет *R*=0, *l* (*l* – расстояние от центра полости до грани куба); (в, г) – *R*=0,35*l*; (д, е) – *R*=0,65*l*; (ж, з) – *R*=0,9*l*

Заключение. Анализ экспериментальных данных, полученных на новом испытательном стенде с комплексной синхронизированной системой измерения параметров физических полей различной природы позволил установить пространственно-временную взаимосвязь между полем акустической эмиссии, эволюцией поля микродеформаций и развитием зоны флюидоразрыва. Полученные данные могут быть применены для раннего предупреждения о тектонической активности и мониторинга развития трещиноватости горных пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. Зименков С.В., Назаров В.Е. Нелинейные акустические эффекты в образцах горных пород. // Физика Земли. 1993. – № 1, С. 13-18.

2. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И. Экспериментальное исследование самовоздействия сейсмоакустических волн. // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45. – № 6, С. 799-806.

3. V. Zaitsev, V. Gusev, B. Castagnede. Luxemburg-Gorky effect retooled for elastic waves: A mechanism and experimental evidence. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89. № 10. p. 105502.

4. Боголюбов Б.Н., Лобанов В.Н., Назаров В.Е., Рылов В.И., Стромков А.А., Таланов В.И. Амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны под действием лунносолнечного прилива. // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 8, С. 1045-1049.

5. V. Tournat, V. Zaitsev, V. Gusev, V. Nazarov, P. Bequin, B. Castagnede. Probing granular media by acoustic parametric emitting antenna: clapping contacts, nonlinear dilatancy and polarization anisotropy. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. № 8. p. 085502.

6. Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Отклонение от закона Гутенберга-Рихтера // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – Вып. 2, С. 29-35.

7. Соболев Г.А., Лементуева Р.А., Лось В.Ф. Изучение спектров акустических сигналов / IX Межд. Школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород»: Тез. Докл. – Иркутск. – 2013, С. 84.

8. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Особенности локализации деформаций при одноосном нагружении горных пород. // IX Межд. Школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород»: Тез. Докл. – Иркутск. – 2013, С. 64.

9. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Надежкин М.В., Горбатенко В.В. Локализация деформации и возможность прогнозирования разрушения горных пород. // ФТПРПИ. – 2014. – № 1, С. 49–56.

10. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А. О некоторых особенностях эволюции напряженно–деформированного состояния образцов горных пород со структурой при одноосном нагружении. // ФТПРПИ. – 2013. – № 5, С. 3–19.

11. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н. Об энергетическом подходе к анализу сложных деформационно-волновых процессов в геоматериалах со структурой под нагружением до разрушения. // Проблемы недропользования (ISSN 2316-1586). – 2014. – № 3, С. 66-80.

12. Усольцева О.М., Назарова Л.А., Цой П.А., Назаров Л.А., Семенов В.Н.. Исследование генезиса и эволюции нарушений сплошности в геоматериалах: теория и лабораторный эксперимент. // ФТПРПИ. – 2013. – № 1, С. 3–10.

13.Yingwei Shi, Qun He, Shanjun Liu, and Lixin Wu. The Time–space Relationship between Strain, Temperature and Acoustic Emission of Loaded Rock. // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Chine. – 2010, p. 23-31.

© В. Н. Опарин, В. И. Востриков, О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, 2015

АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО УГОЛЬНОМУ ПЛАСТУ К-10 ВОСТОЧНОГО КРЫЛА ШАХТЫ «СОКУРСКАЯ»

Геннадий Алексеевич Пак

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, горный инженер-маркшейдер, кафедра маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: kostyaan91@bk.ru

Виктор Николаевич Долгоносов

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: vdolgonosov@gmail.com

Светлана Борисовна Ожигина

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)72-26-65, e-mail: osb66@mail.ru

Алексей Александрович Нагибин

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистр техники и технологии, преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: alex_e1@mail.ru

Статья посвящена изучению влияния скважин НГРП на выбросоопасное состояние угольного пласта К-10 при отработке восточного крыла шахты «Сокурская». Рассмотрена ситуация, возникшая после реализации проекта заблаговременного гидрорачленения пласта скважинами НГРП с поверхности.

Ключевые слова: degasation, coal layer, gasdynamic phenomena, layer hydropartition, outburst zone.

THE ANALYSIS OF THE GASDYNAMIC PHENOMENA AT THE DRIVING OF THE OPENINGS IN K-10 COAL LAYER OF THE EAST WING OF «SOKURSKAYA» MINE

Gennadiy A. Pak

Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira avenue, «Mine surveying and geodesy» department, mining engineer-surveyor, tel. (7212)56-26-27, e-mail: kostyaan91@bk.ru

Viktor N. Dolgonosov

Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira avenue, doctor of tech. sci., Prof. of «Mine surveying and geodesy» department, tel. (7212)56-26-27, e-mail: vdolgonosov@rambler.ru

Svetlana B. Ozhigina

Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira avenue, cand. of tech. sci., assistant professor of «Mine surveying and geodesy» department, tel. (7212)56-26-27, e-mail: osb66@mail.ru

Alexey A. Nagibin

Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, teacher of Mine surveying and geodesy department, tel. (7212)41-11-88, e-mail: alex_e1@mail.ru

The article is devoted to studying the effects of NGRP boreholes at the outburst condition of K10 coal layer in the East wing of "Sokurskaya" mine. Considered the situation, appeared after realization of the preliminary hydropartition of the coal layer using NGRP boreholes, drilled from the surface.

Key words: degasation, coal layer, gasdynamic phenomena, layer hydropartition, outburst zone.

Для обеспечения безопасных условий разработки опасных пластов необходимо проведение заблаговременной поверхностной предварительной дегазации, причем проведение этих мероприятий должно планироваться за несколько лет до начала добычи угля. Помимо поверхностной дегазации на опасных участках должна проводиться горизонтальная дегазация угольных пластов за 1,0 - 1,5 км начала добычи угля В очистном забое. В «Инструкции...» [1] до (пункт 4.2.3) рекомендуется: «Для интенсификации процесса дегазации угольных пластов с низкой проницаемостью..., с целью сокращения сроков дегазации применять гидроразрыв пласта через скважины, пробуренные из подземных выработок...». Мероприятия по предварительной дегазации и добыче метана должны планироваться во взаимосвязи с технологией разработки месторождения, с учетом сдвижения подработанного массива и образованием куполов внутри массива до достижения земной поверхности, на стадии отработки защитных пластов.

Однако применение гидрорачленения пласта на стадии предварительной дегазации может оказать весьма негативное воздействие на угольный пласт, привести к образованию выбросоопасных участков на больших территориях и даже привести к невозможности дальнейшей безопасной эксплуатации месторождения. Примером может служить ситуация, возникшая на восточном крыле шахты «Сокурская» после реализации проекта заблаговременного гидрорачленения пласта К-10 скважинами НГРП с поверхности.

Восточное выемочное поле бывшей шахты «Сокурская» по пласту К-10 имеет размеры по простиранию – 1030 м, по падению – от 700 до 900 м. Глубина разработки составляет 530 – 690 м. Суммарные промышленные запасы превышают 4 млн. тонн высококачественного коксующегося угля. На данном участке находится основная перспектива развития шахты «Саранская» (сейчас это ее запасы). Отработка запасов восточного поля по пласту К-10, решает сразу две важные задачи – подработку более мощного высокогазоносного и опасного пласта К-12 и надработку не менее опасного и газоносного пласта К-7. Тем самым создаются все условия для высокопроизводительной работы лав, концентрации горных работ и безопасных условий труда.

В период 1985 – 1991 гг. с дневной поверхности для заблаговременной дегазации свиты угольных пластов были пробурены скважины для гидрорасчленения. Всего было пробурено 18 скважин НГРП (рис. 1). Из них эффективно
работали лишь несколько скважин: № 1 (3471) К-12 юго-запад (объем метана 1,38 млн.м³), № 2 (3472) К-12 юго-запад (объем метана 1,60 млн.м³), № 3 К-12 юго-запад (объем метана 0,63 млн.м³), № 8 (316) К-12 юго-запад (объем метана 0,62 млн.м³), № 10 (99) К-12 юго-запад (объем метана 0,60 млн.м³), № 11 (98) К-12 юго-запад (объем метана 1,10 млн.м³).



Рис. 1. Выкопировка с плана горных работ по пласту К-10 (Восточный блок, шахта «Сокурская»)

Все перечисленные скважины располагались в непосредственной близости от очистного забоя (от 70 до 170 м). Расстояние между скважинами составляет 180 – 200м, глубина от 690м (в первом ряду скважины № 12 – 15) до 780 м в последнем ряду (скважины № 22 – 27). На реализацию данного проекта были затрачены большие средства, которые не принесли ожидаемого результата.

Во время ведения подготовительных работ (с 1987 по 1994гг) по оконтуриванию выемочного поля восточного крыла в районе неосвоенных скважин произошло сразу 6 газодинамических явлений (выбросы угля и газа) с разрушением крепления горных выработок и обильным выделением метана.

Если учесть, что на шахте за период с 1952 по 1980 годы произошло всего шесть случаев газодинамических явлений, причем значительно менее опасных и по объему выделившегося метана и без нарушения крепления, более похожих на высыпание в районе геологического нарушения, то усматривается связь произошедших событий с выполненными дегазационными работами.

Обратим особое внимание на абсолютное совпадение во времени всех ГДЯ с началом освоения скважин НГРП (начиная с февраля 1987 года), а также точ-

ное совпадение их в пространстве – все ГДЯ произошли либо в зоне действия скважин НГРП или же на площади их обработки. За период с февраля 1987 года и до окончания подготовительных работ по оконтуриванию восточного крыла шахтного поля (май 1994 года) произошло шесть ГДЯ [2].

Мощность разрабатываемого пласта К-10 на восточном крыле сравнительно выдержана и равна 3,2 метра. Непосредственная кровля пласта К-10 сложена слабыми породами с большим количеством прослойков, склонных к расслаиванию с крепостью аргиллита на сжатие до 20 МПа (200 кг/см²) и характеризуется как неустойчивая кровля. Почва пласта К-10 на данном выемочном поле сложена весьма крепкими алевролитами $\sigma_{c,c}$ = 35 МПа (350 кг/см²) и характеризуется как прочная. По данным геологоразведочных работ на оцениваемом участке природная газоносность составляет 19 - 20 м³/т. По отдельным пробам на газ величина природной газоносности оказалась даже несколько выше: на скважине № 20050 – 21,3 м³/т; скважине № 14969 – 23,7 м³/т.

Во всех без исключения случаях, при обследовании забоев, где произошли указанные ГДЯ, угольный пласт имел высокую степень трещиноватости. Кровля пласта или же район контакта кровли и пласта были нарушены, перемяты угольные и породные пачки. Два ГДЯ приурочены к геологическим нарушениям, где вероятность их образования намного выше, чем в ненарушенном пласте.

При подходе к местам возникновения ГДЯ проходка сопровождалась обильным газовыделением. Такое состояние пласта наблюдалось практически во всех местах неосвоенных скважин НГРП. Начиная с 1991 года (после первого ГДЯ, произошедшего в шахте) проходка выработок с восточной стороны стала производиться с противовыбросными мероприятиями. При этом предполагалось проводить 6 восточный дренажный штрек пласта К-10 со значительным опережением от конвейерного штрека и бурить уже из него дегазационные разведочные длиной 22 27м скважины _ И диаметром 80мм с расчетом перебура контура будущего конвейерного штрека не менее чем на 4 метра, и проведения здесь дегазации пласта.

При бурении данных опережающих дегазационных скважин было отмечено высокое газовыделение в выработку во время бурения, повышенный выход штыба. Снаряд в скважине постоянно «зажимало», из скважины «выплевывало» буровую мелочь и воду, а иногда и сам снаряд.

Из четырех последних ГДЯ два произошли не в зоне геологического нарушения, а два приурочены к ним. Во всех без исключения случаях пласт имел высокую степень трещиноватости. Такое состояние пласта наблюдалось во многих местах в районе действия скважин НГРП.

Эти данные подтверждают принятую гипотезу о высокой степени выбросоопасности пласта в районе действия неосвоенных скважин НГРП. Изучив представленный материал, сопоставив результаты, как во времени, так и в пространстве, можно констатировать факт – основными причинами всех газодинамических явлений на восточном крыле шахтного поля шахты «Сокурская» являются выбросоопасные зоны неосвоенных скважин НГРП по пласту К-10 и прямое воздействие гидрорасчленения на состояние этих пластов. Нетронутый массив (разрабатываемый угольный пласт, находящийся на большом удалении от зон ПГД, скважин НГРП и ведения БВР) не представляет такой опасности, как в зонах негативного влияния техногенной деятельности человека.

В соответствии с «Методикой определения параметров гидрорасчленения угольных пластов для условий Карагандинского бассейна» [3], утвержденной техническим директором п/о «Карагандауголь» 29.07.87г, эффективный радиус (R_{эф}) гидравлического воздействия скважин НГРП равен 120 – 140 м. Для построения выбросоопасных зон для условий шахты «Сокурская» эффективный радиус гидравлического воздействия (R_{эф}) примем равным 150м (несколько большим по сравнению с [3] (приложение 12), так как данные скважины оказались неосвоенными). На рис. 1 схематично показана граница «зоны влияния» скважин НГРП, внутри которой можно выделить площади от воздействия на пласт только одной скважины (это крайние районы), есть зоны двойного наложения, имеются зоны тройного наложения скважин НГРП и есть даже зоны наложения четырех скважин сразу. В результате выявлены и классифицированы следующие зоны выбросоопасности: угрожаемая (от воздействия только одной скважины); опасная (от воздействия 2 скважин); особоопасная (от воздействия 3 скважин НГРП) и сверхкатегорийная зона от воздействия 4 и более скважин.

Как видно из выкопировки с плана горных работ (рис. 1), все три последних ГДЯ произошли именно в особоопасных зонах, указанных нами на плане, а ГДЯ на скважине МД-1 произошло в сверхкатегорийной критической зоне. Площадь всей опасной зоны составляет 960 тыс. м², в том числе площадь особоопасной зоны – 250 тыс. м² и площадь критической зоны – 60 тыс. м².

Если некоторая площадь (по 10 м в стороны от пройденных выработок) по внезапным выбросам была нейтрализована (дегазировалась, разрядилась от концентрации напряжений), то в дальнейшем предстоит сделать очень многое, чтобы избежать аналогичных ГДЯ в оставшихся особо выбросоопасных зонах как по пласту К-10, так и по пластам К-12 и К-7.

На момент закрытия выработок 6 горизонта (на 01.01.95 г.) состояние пройденных горных выработок в нетронутом массиве – отличное (по наблюдениям в течение 5 лет, шаг крепления через 0,75 п.м.). Состояние же горных выработок в зоне неосвоенных скважин НГРП – удовлетворительное (по наблюдениям в течение 1 – 1,5 года при шаге крепления 0,5 п.м.). Потери по высоте составили от 0,5 до 1 м, а по сечению – до 4 м².

Помимо экономических показателей также резко ухудшились условия безопасности работы в забое.

Все полученные опасные зоны от вредного влияния неосвоенных скважин НГРП, будут иметь место и по другим неосвоенным пластам свиты: К-12 и К-7 при освоении этих пластов. А это значит, что в будущем предстоит понести немало дополнительных затрат на противовыбросные мероприятия, что повлечет за собой уменьшение темпов проходки, а вместе с ним отодвигаются сроки пуска горизонта в эксплуатацию. Анализ опыта применения скважин НГРП нетронутом горном массиве на восточном крыле шахты «Сокурская» и работы подготовительных забоев в зоне неосвоенных скважин позволяет сделать следующие выводы:

- применение скважин НГРП в нетронутом массиве неэффективно, большинство скважин имели практически нулевой каптаж метана;

- огромные затраты на бурение, освоение скважин НГРП, а также материалы, потребление электроэнергии и транспортные расходы потрачены впустую;

- как показали дальнейшие события, шахте нанесен большой ущерб в виде образованных выбросоопасных зон на всех трех пластах свиты: К-10, К-12, К-7;

- в результате проведенных мероприятий и их последствий под угрозу поставлена перспектива развития шахты, так как могут произойти значительные срывы сроков пуска горизонта и пуска лав на этом крыле шахтного поля;

- на ликвидацию последствий этих работ предстоит потратить огромные дополнительные средства, либо вообще отказаться от разработки данного участка.

Трудно указать хотя бы на один положительный результат от внедрения скважин НГРП на восточном крыле шахтного поля. Из-за большой трещиноватости пласта, вызванной гидрорасчленением, (особенно по пласту К-10) значительно ухудшатся условия безопасности работы людей в забоях при ведении подготовительных, а в будущем и очистных работ. Будут образовываться купола обрушения, которые потребуют дополнительных затрат в подгозабоях товительных И лавах на ИХ закладку ИЛИ бурение шпуров с установкой шильев, и как результат – резкое снижение темпов проходки и угледобычи.

Скважины могут также привести и к затоплению горных выработок при подходе к ним. По нашим оценкам, на вышележащих горизонтах восточного крыла шахты находится порядка 170 тыс. м³ воды.

И, наконец, еще один аргумент не в пользу скважин НГРП. При сравнении ее с простой ВДС (вертикальной дегазационной скважиной) – это ее стоимость и производительность. Для примера – 4 ВДС, пробуренные в лаве 53К-7-ЮЗ выдали 20 млн. м³ метана за 1,5 года, а 18 скважин НГРП – за 5 лет освоения всего 2 млн. м³ метана.

Вопреки существующему мнению о том, что гидродинамическое воздействие на угольный пласт приносит только положительный эффект и направлен против возникновения и развития внезапных выбросов угля и газа при ведении подготовительных и очистных работ в зонах влияния скважин НГРП [4], существуют условия, при которых данный способ, напротив, может способствовать образованию выбросоопасных зон. Практика применения скважин НГРП на шахте «Сокурская» показала, что применение гидрорасчленения пласта эффективно только в непосредственной близости от очистного забоя и должно рассматриваться в единой технологической схеме с добычей угля. На стадии предварительной дегазации, при обработке нетронутых угольных массивов этот метод имеет отрицательные последствия, приводит к образованию выбросоопасных зон и проблемам при дальнейшей отработке месторождения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа // МУП СССР, М. – «Недра». – 1977. – 159 с.

2. Обстоятельства и причины аварий, произошедших на шахтах Карагандинского угольного бассейна (1978 – 2004 гг) // – Караганда, ЦНТИ, 2004.

3. Методика определения параметров гидрорасчленения угольных пластов для условий Карагандинского бассейна. // п/о «Карагандауголь», Караганда, 1987.

4. Внезапные выбросы угля и газа. / Ходот В.В. // М.: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по горному делу, 1961. – 364 с.

© Г. А. Пак, В. Н. Долгоносов, С. Б. Ожигина, А. А. Нагибин, 2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Антон Владимирович Панов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, е -mail: anton-700@yandex.ru

Александр Александрович Скулкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, e-mail: chuptt@yandex.ru

Леонид Валерьевич Цибизов

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, аспирант, e-mail: tsibizov.lv@gmail.com

Роман Иванович Родин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт угля» СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10, аспирант, e-mail: rodinri@mail.ru

Предлагается метод количественной оценки компонент природного поля напряжения в нетронутом массиве на основе натурных данных о давлении запирания в серии трещин гидроразрыва, проведённых в трёх скважинах из выработки, удалённой от места ведения горных работ. Обосновывается состоятельность полученных результатов при помощи численного моделирования методом конечных элементов, а также результатами лабораторных экспериментов.

Ключевые слова: обратная задача, гидроразрыв, измерение напряжений, горная выработка, моделирование, метод конечных элементов.

DETERMINATION OF NATURAL STRESS FIELD COMPONENTS BY DATA OF HYDROFRACTURING FOR STRESS MEASUREMENT

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, e-mail: anton-700@yandex.ru

Aleksandr A. Skulkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, e-mail: chuptt@yandex.ru

Leonid V. Tsibizov

Novosibirsk National Research State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogov St., Postgraduate, e-mail: tsibizov.lv@gmail.com

Roman I. Rodin

Institute of Coal SB RAS, 650065, Russia, Kemerovo, 10 Leningradsky prospect, Postgraduate, e-mail: rodinri@mail.ru

The authors offer the method for quantitative assessment of natural stress field components in intact rock mass based on in situ data on blockage pressure in hydrofractures made from three holes drilled from an underground excavation far from actual mining operations. The consistency of the obtained results is confirmed by FEM modeling and laboratory test data.

Key words: inverse problem, hydraulic fracturing, stress, stress measurement, underground excavation, modeling, finite element method.

При проектировании подземных горных работ напряжённо-деформированное состояние породного массива является вопросом первостепенной важности для обеспечения безопасности и прогноза устойчивости горных выработок. Существует ряд методов, позволяющих провести измерения геомеханических параметров породного массива. При этом остаётся открытым вопрос о достоверности полученных значений напряжений вследствие некорректности постановки и не единственности решения обратной задачи [1]. Среди наиболее распространённых можно выделить методы основанные на измерении смещения или деформации горных пород [2,3], геофизические методы [1,3]. Большинство этих методов являются весьма трудоёмкими и дорогостоящими.

Прямая задача: постановка, метод решения. Рассмотрим отдельно стоящую протяженную горную выработку (рис. 1) в однородном ненарушенном массиве, находящуюся на значительном удалении от места ведения горных работ. Природное поле напряжений практически не будет изменено влиянием горных работ. В первом приближении можно считать, что исследуемый участок находится в плоском деформированном состоянии [4]. Прообразом задачи служат выработки на Таштагольском руднике находящиеся на глубине до 890 м.



Рис. 1. Схема расчетной области и граничные условия

Геометрические значения параметров исследуемой модели (рис.1.): расчетная область имеет размер $L_x = 30 \, \text{м}$, $L_z = 30 \, \text{м}$, диаметр выработки 3 м, длинна каждой из трех скважин, выходящих из выработки 10 м, их диаметр 0.1 м, длина каждой трещины гидроразрыва 0.8 м; шаг дискретизации по пространству 0.1 м. Наклонная скважина повернута на угол 20° к горизонту. Плотность среды $\rho = 3.8 \text{ т/m}^3$, модуль Юнга E = 62 ГПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$.

Проводя по 5 гидроразрывов в каждой скважине, мы усредняем структурные особенности массива и ошибки при измерении за счет чего повышаем точность определения искомых параметров. Расстояние между двумя соседними трещинами гидроразрыва 2 м. Такого расстояния вполне достаточно, чтобы соседние трещины не оказывали влияние друг на друга [5].

Деформирование среды описывается системой уравнений линейной теории упругости: уравнения равновесия (1), закон Гука (2) и соотношения Коши (3).

$$\sigma_{ij,j} + \rho g \delta_{iz} = 0, \qquad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \mathscr{E}_{ij} + 2\mu \mathscr{E}_{ij} , \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}),$$
 (3)

где σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций (*i*, *j* = *x*, *z*); $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}$ – объёмная деформация, *u_i* - смещения; λ и μ - параметры Ламе; δ_{ij} -дельта Кронекера.

На границе расчетной области сформулируем следующие условия (рис. 1):

$\sigma_{xx}(0,z) = 47.5 M\Pi a ,$	$\sigma_{xz}(0,z) = 15 M\Pi a;$
$u_x(L_x,z)=0,$	$\sigma_{xz}(L_x,z)=0;$
$\sigma_{zz}(x,0) = 25 M\Pi a ,$	$\sigma_{xz}(x,0) = 15M\Pi a;$
$u_z(x,L_z)=0,$	$\sigma_{xz}(x,L_z)=0,$

Контур выработки свободен от напряжений.

Расчеты осуществлялись с использованием оригинального кода [6], реализующего 2D метод конечных элементов для структурно-неоднородных сред с нарушениями сплошности. В каждой из трех скважинах мы последовательно проводим 5 гидроразрывов и определяем в них давление запирания. Эти данные будут входными для решения обратной задачи.

На трещину гидроразрыва, заполненной идеальной жидкостью действует нормальное напряжение [7]:

$$\sigma = \sigma_{xx} \sin^2 \alpha + \sigma_{zz} \cos^2 \alpha - \sigma_{xz} \sin 2\alpha$$

Считаем, что трещина распространяется перпендикулярно скважине, угол *α* – угол между трещиной и осью *х*.

Введем целевую функцию:

$$F(\sigma_{xx},\sigma_{zz},\sigma_{xz}) = \sum_{n=1}^{15} \left[\sigma_n^{meop}(\sigma_{xx},\sigma_{zz},\sigma_{xz}) - \sigma_n^{u_{3M}}\right]^2,$$

где $\sigma^{meop}(\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz})$ соответствует теоретически рассчитанному напряжению, которое действует по нормали к трещине, а $\sigma^{u_{3M}}$ - давления запирания, которое мы измеряем в трещине гидроразрыва, n – номер трещины гидроразрыва. В общем случае, $\sigma^{u_{3M}}$ зависит от $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}, E, v, l$ (где l – длина трещины), в первом приближении будем пренебрегать объемом закаченной жидкости в трещину, поэтому $\sigma^{u_{3M}}$ будет зависеть только от внешних напряжений.

Проведем анализ целевой функции *F* с использованием синтетических входных данных. Для этого в качестве измеренного давления запирания мы будем принимать теоретически рассчитанное напряжение при известных значениях $\sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*, \sigma_{xz}^*$. Эти значения мы будем «искать» при решении обратной задачи. Решение задачи сводится к нахождению минимума целевой функции, найдя минимум, определим значения неизвестных параметров $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$.

Входные данные рассчитывались следующим образом:

$$\sigma^{\mathcal{U}\mathcal{3}\mathcal{M}} = (1+\delta) \Big[\sigma^*_{\mathcal{X}\mathcal{X}} \sin^2 \alpha + \sigma^*_{\mathcal{Z}\mathcal{Z}} \cos^2 \alpha - \sigma^*_{\mathcal{X}\mathcal{Z}} \sin 2\alpha \Big],$$

где δ - равномерно распределенная на отрезке $[-\xi,\xi]$ случайная величина (ξ -амплитуда помехи); $\sigma_{xx}^*, \sigma_{zz}^*, \sigma_{xz}^*$ - точное решение обратной задачи, помеченное далее на рисунках белым кружком.

На рис. 2 представлены изолинии целевой функции *F* при различных уровнях ошибки во входных данных ξ (от 5% до 20%). Темными зонами обозначены области минимума целевых функций белыми кружками – точное решение. Изолинии построены для двух аргументов целевой функции, третья переменная фиксировалась на уровне $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}^*$.



Рис. 2. Изолинии целевой функции F при различных ошибках во входных данных ξ , при $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}^*$.

Видно, что целевая функция имеет единственное решение. Характерная структура изолиний говорит о том, что решение обратной задачи можно успешно искать градиентными методами [8]. Отметим, что имея ошибку в 20%

можно получить значение напряжений σ_{xx}, σ_{zz} с точностью порядка 10%. Это связанно с тем, что мы измеряем значения напряжения в нескольких точках на скважине и используем случайную ошибку в расчетах.

Заключение. Предложен метод количественной оценки компонент природного поля напряжения в нетронутом массиве на основе натурных данных о давлении запирания в серии трещин гидроразрыва. Для определения полного тензора напряжений необходимо провести измерения в двух перпендикулярных выработках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-31482).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Попов С.Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. – Новосибирск: Наука, СО РАН. – 1983.

2. Гребенкин С.С., Павлыш В.Н., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А., Управление состоянием массива горных пород. – Донецк: ДонНТУ. – 2010.

3. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра. – 1989.

4. J.C. Jaeger, G.W. Cook, Fundamentals of Rock Mechanics. – London: Methuen. – 1969, p. 513.

5. Шер Е.Н., Колыхалов И.В., Михайлов А.М. Моделирование развития осесимметричных трещин при множественном гидроразрыве. // ФТПРПИ. – № 5. – 2013, С. 70-79.

6. L.A. Nazarova, Stress State of Sloping–Bedded Rock Mass Around a Working. // Soviet Mining Science, 21(2). – 1985, pp. 132–136.

7. А.И. Кошелев, М.А. Нарбут. Механика деформируемого твердого тела. – Санкт-Петербург: СПет. гос. ун-т. – 2002, 286с.

8. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. – Новосибирск: Сибирское научное изд. – 2009, 457с.

© А. В. Панов, А. А. Скулкин, Л. В. Цибизов, Р. И. Родин, 2015

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОТЯЖЕННЫХ ПЛАСТОВЫХ СКВАЖИНАХ

Андрей Владимирович Патутин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Сергей Владимирович Сердюков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

Для обеспечения безопасности подземных горных работ применяются различные технологии, позволяющие снизить риски возникновения опасных ситуаций. При разработке угольных месторождений используют дегазационные скважины, через которые откачивают метан из пластов, повышая безопасность добычи. В последнее время наблюдается развитие технологий направленного бурения протяженных скважин из выработок, которые имеют длину до 1 000 метров с минимальным отклонением от заданной траектории. Предложен способ проведения исследований в протяженных дегазационных скважинах с помощью оригинальной роботизированной системы доставки на основе сдвоенной пакерной системы. Отличительными особенностями разрабатываемого оборудования является возможность комплексных профильных измерений вдоль ствола скважины с записью уникальных данных нетронутого разработкой массива.

Ключевые слова: пластовые скважины, свойства массива, напряженное состояние, система доставки.

METHODOLOGICAL SOLUTIONS FOR GEOMECHANICAL PROPERTIES DETERMINATION OF ROCKS IN LONG IN-SEAM WELLS

Andrey V. Patutin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, research associate, 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. Sci., head of laboratory, tel. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

To ensure the safety of underground mining, there are different technologies to reduce the risk of sudden rock outbursts. Coal mines are equipped with degasification system and often have a number of boreholes for efficient and effective gas drainage. The development of in-seam directional drilling technology results in an increase in the length of the wells drilled from underground workings. Up-to-date rigs allow drilling more than 1 000 meters with a minimum deviation from the desired path.

The aim of the study is to develop techniques and methodical approaches to an evaluation of geomechanical condition and physical properties of a rock mass at a considerable distance from the underground workings. As a result, the work provides a new way of logging in long methane drainage boreholes with original automatic delivery system based on the straddle packer assembly. Distinctive features of the equipment to be developed are the possibility of complex profile measurements along the borehole with unique properties of intact rock mass recording.

Key words: in-seam wells, rock massif properties, stress state, delivery system.

Угольные шахты относятся к опасным производственным объектам, при авариях на которых травмируются люди, в том числе со смертельным исходом. Несмотря на то, что решению проблемы предотвращения подобных аварий и минимизации их последствий уделяется значительное внимание ученых и специалистов, тем ни менее аварийность, обусловленная взрывами метана в действующих выемочных участках, остается на недопустимо высоком уровне. Наиболее разрушительными и мощными, в том числе по травматическому воздействию на людей, взрывы метана происходят в шахтах, в которых отрабатываются пологие угольные пласты высокопроизводительными очистными механизированными комплексами. Особую озабоченность вызывает то, что в последние годы в высокопроизводительных шахтах, отрабатывающих пологие угольные пласты, взрывы метана стали доминирующим видом аварий.

Повышение интенсивности, глубины, сложности геолого-физических условий и геодинамической обстановки подземной разработки угольных месторождений современными высокопроизводительными техническими комплексами уменьшает время для принятия решений и корректирования процесса разработки после обнаружения проблемных участков перед фронтом очистных работ. Это ведет к простоям дорогостоящего горного оборудования, снижает производительность труда в угледобывающей отрасли.

Недостаточность заблаговременной информации о состоянии массива горных работ повышает риск катастрофических проявлений горного давления, гидро- и газодинамических явлений, особенно при разработке глубокозалегающих газоносных угольных пластов.

Одним из элементов решения этой проблемы является повышение глубины и комплексности исследований состояния углепородного массива, в частности, за счет выполнения измерений в протяженных пластовых скважинах направленного бурения, технология создания которых получила распространение в горнодобывающей промышленности развитых стран. Другой важной проблемой является развитие методов прогнозной оценки реакции газоносных угольных пластов на техногенные изменения геомеханического состояния в зоне влияния очистных работ.

Скорость разработки угольных пластов современными высокопроизводительными очистными комплексами часто ограничивается только по газовому фактору. Для снижения количества метана в очистном забое применяется предварительная дегазация. Рост объемов бурения протяженных дегазационных скважин из выработок, в том числе с помощью комплексов направленного бурения, позволяет говорить, что все больше внимания уделяется вопросам безопасности и рационального использования метана угольных пластов. Современные буровые установки (рис. 1) позволяют проходить до 1000 м и более по угольному пласту, контролируя положение долота в каждый момент времени; имеют различный размер и модульное строение, позволяют достигать больших объемов бурения дегазационных скважин [1, 2].



Рис. 1. Установки направленного бурения: *1*–VLD 1000A (Австралия), 2 – ZDY 4000 LD (Китай)

Опыт разработки газоносных угольных пластов в Китае и Австралии показывает эффективность дегазационных схем, основанных на большом объеме направленного глубокого бурения из горных выработок. В каждом случае утверждается определенная схема разбуривания, оцениваются такие параметры как время дегазации, снижения содержания метана и прочие.

Для проведения эффективной дегазации нужны данные по газоносности, фильтрационным свойствам и геомеханическому состоянию угольных пластов. Одной из основных причин несвоевременности прогноза выбросоопасности участков углепородного массива и объемов метановыделения в горные выработки и дегазационные скважины является отсутствие надежных систем комплексных скважинных исследований в протяженных скважинах. Такие исследования необходимы для оптимизации технологических схем предварительной дегазации, оценки опасности катастрофических проявлений газодинамических явлений и горного давления, поисков перспективных участков добычи метана, прогноза выбросоопасности.

Встречается мало работ, посвященных геофизическим и гидродинамическим исследованиям протяженных скважин, пробуренных из подземных выработок. Чаще всего данные об углепородном массиве получают в процессе бурения с помощью гамма каротажа.

Проведение комплекса ГИС осложнено специфическими условиями записи: скважины часто не содержат бурового раствора, используемые в традиционной нефтяной отрасли приборы требуют дополнительных калибровок, так как существуют значительные отличия в физических свойствах углей и пород нефтегазоносного комплекса, оборудование должно быть выполнено во взрывобезопасном исполнении. Другой проблемой является то, что данные скважины сразу подключаются к общей системе удаления метана и не используются для определения уникальных свойств незатронутого разработкой массива.

Исходя из анализа известных решений, предложена оригинальная идея совмещения в одном устройстве роботизированной системы доставки в заданный интервал скважины, модулей герметизации интервала гидроразрыва и инициатора гидроразрыва горных пород в плоскости ортогональной оси скважины. Использование системы с двумя сдвоенными пакерами позволяет проводить гидравлический разрыв породы с целью интенсификации дегазации массива, либо применять метод измерительного разрыва для оценки напряженного состояния пласта. Конструкция устройства обеспечивает возможность его самостоятельного передвижения вглубь скважины без досылочных устройств (рис. 2).



1 – надувные пакеры; 2 – гидравлический цилиндр; 3 – интервал разрыва

На первом шаге устройство помещают в скважину для проведения исследований, оба пакера находятся в нерабочем состоянии. Перед началом движения подают давление в дальний от устья скважины пакер, что приводит к его надежному закреплению. Затем с помощью гидравлического цилиндра происходит подтягивание всего устройства относительно закрепленного пакера (шаг 2). После этого надувают ближний пакер, а дальний от устья скважины пакер сдувают, сбрасывая давление. Специальная пружина подтягивает дальний пакер к гидравлическому цилиндру (шаг 3). После сбрасывания давления в ближнем пакере устройство завершает один цикл движения и начинается новый цикл. Профильные измерения физических свойств массива, а также гидроразрыв, могут проводиться при вытягивании устройства из скважины или его работы в реверсном режиме. Замеры или воздействия проводятся в заданных точках с необходимой частотой.

Относительно небольшие размеры устройства позволят проводить операцию направленного гидроразрыва в искривленных скважинах, а применение пакерных оболочек длинной до 1 метра значительно улучшит качество герметизации интервала разрыва и исключит обход пакеров трещиной. Получение поперечной трещины предлагается обеспечивать за счет малой длины интервала разрыва (менее двух диаметров скважины) и встроенного инициатора гидроразрыва горных пород в плоскости оси скважины.

Данная компоновка позволяет выполнять множественный поинтервальный разрыв в пластах с целью интенсификации дегазации метана [3], постановку непроницаемых для газа и воды экранов с помощью двухкомпонентных затвердевающих жидкостей разрыва[4, 5], а также оценивать напряженное состояние массива за счет выполнения измерительного гидроразрыва [6].

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках проекта RFMEFI60414X0096.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hungerford F., Ren T., Aziz N. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. –Vol. 23.– P. 543–553.

2. Karacan C. Integration of vertical and in-seam horizontal well production analyses with stochastic geostatistical algorithms to estimate pre-mining methane drainage efficiency from coal seams: Blue Creek seam, Alabama. //International Journal of Coal Geology.– 2013. –Vol. 114. – P. 96–113.

3. Jeffrey R.G., Boucher C. Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal Inseam Gas Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine // In: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongong,February 4–6, 2004). – Wollongong: University of Wollongong, 2004. – P. 169–179.

4. Курленя М.В., Сердюков С.В., Шилова Т.В., Патутин А.В. Герметизация дегазационных скважин угольных пластов методом барьерногоэкранирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 4. – С. 189–194

5. Курленя М.В., Сердюков С.В., Шилова Т.В., Патутин А.В. Методические основы и технические средства герметизации дегазационных скважин методом барьерного экранирования. // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С. 203–210.

6. Мартынюк П. А., Павлов В. А., Сердюков С. В.Комплексное использование гидроразрыва и деформационных измерений в оценке напряженного состояния массива проницаемых горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 2. – С. 155–163.

© А. В. Патутин, С. В. Сердюков, 2015

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ АДАПТЕРА В СИСТЕМЕ «УДАРНАЯ МАШИНА – АДАПТЕР – ПОГРУЖАЕМЫЙ ОБЪЕКТ»

Анатолий Михайлович Петреев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)217-14-04, e-mail: ampet@yandex.ru

Александр Сергеевич Смоленцев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)220-15-09, e-mail: smolencevas@yandex.ru

Рассмотрена система «ударник – адаптер – погружаемая труба». По результатам модельных экспериментов установлена эффективность передачи энергии удара на трубу и максимальной силы на ее торце с учетом соотношения площадей поперечного сечения трубы и ударника.

Ключевые слова: удар, передача энергии, адаптер, труба, жесткость, расчетная модель, труба.

EFFECT OF ADAPTER STIFFNESS IN THE PERCUSSION MACHINE-DRIVEN OBJECT SYSTEM

Anatoly M. Petreev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Drilling and Production Impulse-Forming Machines Laboratory, tel. (383)217-14-04, e-mail: ampet@yandex.ru

Alexander S. Smolentsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Junior Researcher, Drilling and Production Impulse-Forming Machines Laboratory, tel. (383)220-15-09, e-mail: smolencevas@yandex.ru

The authors examine the hammer – adapter – driven pipe system. The simulation experiments have revealed the efficiency of the blow energy transmission to the pipe and the maximum force at the pipe end, considering the ratio of cross-section areas of the pipe and hammer.

Key words: blow, energy transmission, adapter, pipe, stiffness, simulation model, pipe.

При бестраншейной прокладке подземных коммуникаций широко применяются технологии, при которых продвижение трубы в грунте обеспечивается ударным воздействием. Для соединения ударной машины с погружаемой трубой и передачи ей энергии удара чаще всего используются специальные переходные устройства – адаптеры. Существенный вклад в исследования эффективности передачи ударного импульса при забивании металлических труб и стержней в грунт внесли работы, выполненные под руководством А.Л. Исакова [1]. Согласно проведенным ими исследованиям, коэффициент эффективности ударного импульса погружаемому в грунт стержню находится в прямой зависимости от массы и жесткости промежуточного элемента (адаптера), передающего удар, наличия и размеров присоединенной к стержню массы и жесткости стержня.

Чаще всего адаптеры представляют собой одно или набор колец конусного типа, которые сопрягаются с трубой своей наружной или внутренней конусной поверхностью. Торцевой адаптер можно рассматривать как предельную трансформацию конусного при увеличении угла конусности до 90⁰. Согласно исследованиям, поведенным как экспериментальным, так и расчетным путем установлено, что торцевой адаптер обеспечивает лучшую передачу энергии, чем другие типы адаптеров [2]. Поэтому возникла необходимость обосновать рациональные параметры торцевого адаптера.

Торцевой адаптер можно рассматривать как кольцевую пластину, равномерно нагруженную по внутреннему периметру и опертую по контуру (рис. 1). Жесткость такой пластины определяется по известной [3] формуле:

$$c = \frac{F}{\omega_{\text{max}}} = \frac{4 \cdot E \cdot h^3}{q \cdot D^2},\tag{1}$$

где h – толщина кольца, м; q – коэффициент (q = f(D/d), D – наружный диаметр кольца, м; E – модуль упругости материала, Па. Наружный диаметр D определяется диаметром забиваемой трубы, а внутренний d – размерами наковальни.



Рис. 1. Схема к расчету жесткости адаптера

Исследование передачи энергии удара через адаптер торцевого типа проводилось посредством компьютерного моделирования. Для компьютерного моделирования динамических процессов использовалась многомассовая дискретная модель системы "ударный привод – адаптер – труба – грунт". Основу математического описания составляет система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Подробное описание расчетной модели исследуемой системы приведено в [1].

Так как адаптер непосредственно контактирует с забиваемой трубой, то целесообразно увязать жесткость адаптера с жесткостью забиваемой трубы. Поэтому в качестве характеристики согласования адаптера с трубой введён безразмерный параметр "z", являющийся отношением жесткости торцевого адаптера к жесткости трубы единичной длины. С другой стороны, чтобы охватить весь диапазон труб, забиваемых каким либо пневмомолотом, в расчете учитывался также такой параметр, как $\zeta = S_{\rm Tp}/S_{\rm yg}$, где $S_{\rm Tp}$ – площадь поперечного сечения трубы, м; $S_{\rm yg}$ – усредненная площадь поперечного сечения ударника. Как показал анализ ударных устройств, применяемых для забивки труб различного диаметра, отношение $\zeta = S_{\rm Tp}/S_{\rm yg}$ обычно меньше единицы и находится в диапазоне 0,3 ÷ 0,75. Таким образом, в модели охватывается вся цепочка ударникадаптер-труба.

Что касается такого важного параметра как масса адаптера, то форма кольцевого диска делает её однозначно зависимой от диаметра трубы и толщины адаптера, т.е. в конечном счете, от его жесткости. Поэтому при моделировании каждому значению z и ζ назначалось соответствующее значение массы.

Результаты расчетов приведены на графиках рис. 2 и 3. Видно, что в рассматриваемом диапазоне изменения ζ соотношение жесткостей ударника и трубы слабо влияет на передачу энергии, что позволяет для всего диапазона $0,75 \ge \zeta \ge 0,3$ представить усредненные аппроксимирующие кривые для коэффициента передачи энергии удара $\tilde{A} = f_A(z), \quad \tilde{A} = A_i / A_{z=10}$ и относительной величины максимальной силы на торце трубы $\tilde{Q} = f_Q(z), \quad \tilde{Q} = Q_i / Q_{z=10}$.



Рис. 2. Зависимость относительной переданной энергии от параметра z

Функции $\tilde{A} = f_A(z)$ и $\tilde{Q} = f_Q(z)$ хорошо описываются экспоненциальной зависимостью вида: $\tilde{Q} = Q_2 / Q_1 = A_Q - B_Q \cdot e^{-(C_Q \cdot Z + D_Q)}$.

Из графиков видно, что увеличение относительной жесткости адаптера выше z=10 передачу энергии не улучшает. Вместе с тем, избыточная жесткость означает увеличение толщины и, соответственно, массы адаптера, что может приводить к увеличение коэффициента отскока ударника. Минимальные значения параметра z ограничены прочностью.



Рис. 3. Зависимость относительного максимального значения силы от параметра z

Одновременно с ростом передаваемой энергии наблюдается и повышение максимальных значений силы в ударном импульсе.

Существенно, что передаваемая энергия растет менее интенсивно, чем сила (рис. 4). Это наглядно отражает диаграмма на рис. 5, показывающая, на сколько процентов снизится максимальное значение силы, если пойти на некоторую потерю энергии за счет уменьшения относительной жесткости z. Например, видно, что 8-и процентный недобор энергии при z =3 позволяет на 23% снизить наибольшее значение силы.



Рис. 4. Зависимость относительных значений переданной энергии и максимальной силы от относительной жесткости адаптера z

Подобный компромисс полезен, когда необходимо снизить нагрузку на сварные швы забиваемой плети. При этом следует иметь в виду, что уменьшение жесткости адаптера не может быть безграничным и в каждом конкретном случае следует контролировать его прочность.



Рис. 5. Диаграмма компромиссов между \tilde{A} и \tilde{Q} при различных z

Выводы:

1. Передача энергии через торцевой адаптер улучшается с ростом отношения z -жесткости адаптера к жесткости одного метра трубы, но лишь до $z \approx 10$.

2. По мере изменения относительной жесткости торцевого адаптера z от z = 10 в меньшую сторону напряжение в трубе снижается заметно интенсивней, чем передача энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаков, А.Л., Шмелев В.В. Об эффективности передачи ударного импульса при забивании металлических труб в грунт. // ФТПРПИ. – 1998. – №1. – с. 89 – 97.

2. Петреев, А.М., Смоленцев А.С. Передача энергии от ударного привода трубе через адаптер. // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – с. 64 – 74.

3. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 1. Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М: Машиностроение. – 1968. – 831 с.

© А. М. Петреев, А. С. Смоленцев, 2015

ОСОБЕННОСТЬ РАБОТЫ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО КЛАПАНА КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПНЕВМОУДАРНЫХ МАШИН

Анатолий Михайлович Петреев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)217-14-04, e-mail: ampet@yandex.ru

Александр Юрьевич Примычкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)220-15-09, e-mail: sania385@ngs.ru

Описан пример применения кольцевого упругого клапана (КУК) в пневмоударной машине. Приведены базовые формулы, определяющие условия начала его открытия и закрытия. На основе результатов, полученных при экспериментах на стенде и расчетным путем с использованием программы Solid Works, установлена закономерность изменения давления в клапанной щели в процессе срабатывании КУК круглого сечения. Получены выражения, определяющие закономерность изменения сил, действующих в процессе срабатывания.

Ключевые слова: пневмоударная машина, кольцевой упругий клапан, давление в клапанной щели, условие срабатывания, эксперимент, расчетная модель.

SPECIFICITY OF OPERATION OF ROUND ELASTIC VALVE IN AIR DISTRIBUTION SYSTEM OF PNEUMATIC PERCUSSION MACHINES

Anatoly M. Petreev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Drilling and Production Impulse-Forming Machines Laboratory, tel. (383)220-15-09, e-mail: sania385@ngs.ru

Alexander Yu. Primychkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, Drilling and Production Impulse-Forming Machines Laboratory, tel. (383)220-15-09, e-mail: sania385@ngs.ru

The paper exemplifies operation of ring elastic valve (REV) in pneumatic percussion machine. The basic formulas defining conditions of the valve opening and closure are given. Based on the bench testing results and the calculated data using Solid Works program, the authors find the mechanisms of pressure change in the valve slot under actuation of round REV. The authors have derived expressions describing the mechanism of change of forces during the valve actuation.

Key words: pneumatic percussion machine, ring elastic valve, valve slot pressure, actuation condition, experiment, simulation model.

Перспективным направлением совершенствования пневматических машин является разработка систем воздухораспределения с использованием кольцевого упругого клапана (КУК). Преимуществами по сравнению с другими систе-



Рис. 1. Кольцевой упругий клапан круглого сечения



Рис. 2. Схема сил, действующих на клапан

мами воздухораспределения являются: компактность, простота конструкции, способность при небольшом перемещении управлять большими проходными сечениями [1].

Профиль упругого клапана, помимо прямоугольного [2] может быть круглым (рис. 1). Массовое применение уплотнительных колец круглого сечения в гидравлике и пневматике обусловлено хорошей герметизацией такими кольцами подвижных и неподвижных сопряжений, их компактностью и долговечностью. Различие между упругим клапаном и стандартным уплотнением заключается в величине уплотняемого зазора и в режиме работы кольца. В типовом уплотнении кольцо герметизирует зазор в первую очередь за счет упругой деформации его сечения при монтаже с натягом как по внутреннему, так и по внешнему диаметру. Силы давления сжатого воздуха и создаваемый ими эффект уплотнения здесь играет второстепенную роль. В упругом клапане, наоборот, уплотнение обеспечивается только за счет прижатия клапана к цилиндру давлением сжатого воздуха, а предварительное поджатие к цилиндру отсутствует.

Для формирования устойчивого рабочего цикла пневмоударной машины важно знать, при каких условиях начинается переход клапана из положения "закрыто" в положение "открыто" и обратно. Начало перехода — это пограничное состояние статического равновесия сил, действующих на клапан, когда реакция со стороны ограничителя (цилиндра или втулки) становится рав-

ной нулю (рис. 2). В работе [3] представлена математическая модель срабатывания упругого клапана, приведены формулы для определения размеров клапана при заданных давлениях срабатывания клапана и наоборот – давление срабатывания при заданных размерах.

Условие равновесного состояния КУК определяется выражением:

$$p_1 = \frac{2E\varepsilon Z + p^*(1+Z)}{1-Z}; \qquad Z = \frac{\pi d}{4D}$$
(1)

Здесь E – модуль упругости материала клапана, ε – относительная деформация клапана; Z – геометрическая жесткость клапана, p_1 и p_2 – соответственно, давление в рабочих камерах машины до и после клапана, p^* – среднее давление в клапанной щели, d – диаметр поперечного сечения, D – средний диаметр.

Видно, что основным параметром упругого клапана, является геометрическая жесткость Z, которая определяется диаметром поперечного сечения и средним диаметром клапана.

Неопределенность в уравнении (1) связана с параметром p^* . В качестве первого приближения было принято, что p^* есть среднее арифметическое давлений в камерах перед клапаном (p_1) и за ним (p_2). Ясно, что такая упрощенная зависимость должна быть дополнена корректирующей функцией $\psi(\delta)$, учитывающей ширину клапанной щели δ . Тогда среднее давление p^* можно представить:

$$p^* = \psi \cdot (p_1 + p_2)/2; \quad \psi = \psi(\delta).$$
⁽²⁾

Исследования среднего давления в клапанной щели проводились в программе Solid Work Flow Simulation. Методика изложена в [2]. Для оценки влияния диаметра поперечного сечения клапана на результаты исследований, расчеты проводились для двух вариантов: d = 6 мм и d = 15 мм. Результаты представлены на рис. 3, 4.



На рис. 5 представлены графики изменения ψ в зависимости от величины клапанной щели. Видно, что максимальное расхождение среднего давления при диаметре клапана d = 6 мм и d = 15 мм не превышает 6%. Таким образом, можно считать, что диаметр круглого клапан не влияет на величину среднего давления в клапанной щели.



Рис. 5. Сравнение распределения давления в щели упругих клапанов d = 6 мм и d = 15 мм

Кривая изменения среднего давления не линейна, с практически одинаковыми значениями ($\psi = 1$) при $\delta = 0$ и $\delta = 2$ мм и плавным проседанием в середине ($\delta = 1$) до уровня $\psi = 0.8$. Эта закономерность может быть заложена в компьютерную модель КУК, описывающую движение клапана в процессе работы машины.

Для предварительного инженерного выбора параметров упругого кольца можно обойтись и без полного описания динамики КУК. Учитывая чувствительность к износу торообразного КУК, предпочтительно использовать не для работы на подвижном ударнике, а на неподвижной оправке, т.е. в первую очередь для управления подачей сжатого воздуха в рабочую камеру пневмоударной машины. Обычно перед открытием КУК зазор $\delta = 0$ (т.е. $\psi = 1$), при этом давление p_1 перед ним стабильно близко к сетевому. Пороговое значение давления подпитки рабочей камеры p_2 , при котором может начаться открытие, формально определяется из (1) и (2) при $\psi = 1$. Однако, по мере открытия КУК, т.е. по мере роста δ ($\delta \rightarrow 1$) имеем $\psi = 0,8$ и условие (1) нарушается, клапан может зависнуть. По этому давление подпитки, требуемое для надежного открытия, следует определять при $\psi = 0,8$ и ε , соответствующем $\delta = 1$. Тогда из (1) и (2) имеем:

$$p_2 = p_{2omkp} = \frac{p_1(0,6-1,4Z) + 2E\varepsilon Z}{0,4+0,4Z}.$$
(3)

По той же причине просадки среднего давления над клапаном ψ от 1 до 0,8 на полпути КУК от состояния "открыто" до состояния "закрыто" давление p_2 должно определяться при $\psi = 1$ и ε , соответствующем $\delta = 0$. Из (1) и (2) получаем:

$$p_2 = p_{2_{3akp}} = \frac{p_1(0.5 - 1.5Z) - 2E\varepsilon Z}{0.5 + 0.5Z}.$$
(4)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаун В.А. Разработка и исследование погружных пневмоударников с повышенной энергией удара. // Повышение эффективности пневмоударных буровых машин. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР. – 1987.

2. Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Особенность работы кольцевого упругого клапана прямоугольного сечения в системе воздухораспределения пневмоударных машин. / Сборник материалов международной научной конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь 2013». Том 3. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология. – Новосибирск: СГГА. – 2013, С.5 8 - 63

3. Петреев А.М., Воронцов Д.С., Примычкин А.Ю. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах. // ФТПРПИ – 2010. – №4. – с. 56 – 65.

© А. М. Петреев, А. Ю. Примычкин, 2015

УДК 622.7

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ В ОБОГАЩЕНИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Виктор Иванович Ростовцев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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 радиационно-термической обработки минералов. Установлено, что указанный метод позволяет изменять магнитные свойства железосодержащих сульфидных минералов. Показано, что удельный магнитный момент минералов после их обработки пучком ускоренных электронов возрастает в десятки и сотни раз за счет образования магнитных фаз в виде Fe_2O_3 , γ - Fe_2O_3 и Fe_3O_4 в разных сочетаниях, тогда как при обычном нагревании фиксируется образование только одной фазы Fe_3O_4 . Селективно-направленное изменение магнитных свойств железосодержащих минералов при их радиационно-термической обработке открывает перспективы для создания эффективных, экологически чистых технологий переработки комплексных руд сложного состава и продуктов их обогащения.

Ключевые слова: минеральное сырье, сульфидные минералы, радиационно-термическая обработка, магнитные свойства.

RADIATION-HIGH TEMPERATURE METHOD OF MODIFYING MAGNETIC PROPERTIES OF MINERALS IN PROCESSING

Victor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Principal Researcher, Mineral Processing and Process Ecology Laboratory, tel. (383)217-02-80, e-mail: benevikt@misd.nsc.ru

The paper describes experimental research into radiation-high temperature treatment of minerals. It has been found that this method enables modification of magnetic properties of iron-bearing sulfide minerals. The author shows that specific magnetic moment of minerals grows tens and hundreds of times after exposure to beam of accelerated electrons due to generation of magnetic phases in the form of Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ in various combination, whereas regular heating only generates the phase of Fe₃O₄. The selective, targeted modification of magnetic properties of ironbearing minerals under radiation-high temperature treatment opens new prospects for creating efficient and ecology-friendly processing technologies for complex ores and concentrates.

Key words: raw materials, sulfide minerals, radiation-high temperature treatment, magnetic properties.

Предметом теоретических и экспериментальных исследований в области обогащения полезных ископаемых является ориентация на интенсификацию действующих и создание новых методов и средств извлечения ценных компонентов из минерального и техногенного сырья. Особую актуальность приобрели экономико-экологические проблемы горнодобывающих и перерабатывающих производств, обусловленные явными проявлениями негативной тенденции ухудшения качества добываемого сырья и состоянием техники, технологии и организации первичной его переработки.

Наибольшие потери ценных компонентов от добычи руды до получения металла связаны с процессами обогащения полезных ископаемых и составляют от 10 до 30% [1]. В этих условиях создание высокоэффективных, экологически безопасных технологий приобретает особенно важное значение. Следует отметить, что выдающийся российский ученый, член-корреспондент АН СССР И.Н. Плаксин считал, что одним из важнейших направлений при переработке руд является поиск таких энергетических воздействий, которые существенно повысят полноту и комплексность использования минерального сырья при его обогащении. Он обосновал эффективность применения внешних воздействий в процессах обогащения полезных ископаемых [2].

В [3-4] 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.

В настоящей работе рассмотрен радиационно-термический метод изменения магнитных свойств минералов при обогащении минерального сырья.

Магнитное обогащение – широко используемый способ для извлечения магнитных или слабомагнитных минералов из железосодержащих и других руд, основанный на различиях в магнитных свойствах составляющих компонентов. Этот технологический процесс характеризуется высокой эффективностью и его применение мало отражается на загрязнении окружающей среды.

Однако различия в магнитных свойствах большинства природных минералов недостаточно велики для их эффективного разделения, что в отдельных случаях снижает технологические показатели обогащения, особенно слабомагнитных железных руд. С целью повышения эффективности обогащения необходимо увеличение этих различий физическими, физико-химическими, и даже химическими способами. В промышленных и лабораторных условиях часто используются процессы изменения объемных и поверхностных магнитных свойств.

Одним из таких объемных процессов является обжиг, который основан на превращении слабомагнитных железосодержащих минералов в магнитные компоненты (магнетит или γ-гематит) в определенных условиях (окислительная, нейтральная или восстановительная среда) при постоянной температуре. Этот процесс в промышленности является основным для изменения объемных магнитных свойств железосодержащих руд. При этом главные проблемы – большое энергопотребление, длительность процесса, высокая стоимость процесса обжига и загрязнение воздуха.

Обработка пучком электронов, как быстрый и эффективный метод нагревания для фазовых превращений, подробно изучался и широко используется в процессах тепловой обработки металлов. Установлено, что и магнитные свойства руд слабомагнитных минералов могут быть изменены с помощью обработки потоком высокоэнергетических электронов, что имеет большое значение для интенсификации обогащения слабомагнитных руд и разделения минералов со сходными свойствами [5-7].

В лабораторных экспериментах изучались некоторые железосодержащие сульфидные минералы – пирит, арсенопирит, халькопирит, марматит и др. Обработка минеральных порошков различной крупности производилась на промышленном ускорителе электронов ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН. Температура облучаемого образца измерялась термопарой и регулировалась контрольной системой ее поддержки. Оценка магнитных свойств минералов по изменению удельного магнитного момента осуществлялась с помощью вибрационного магнитометра типа LDJ9600 (LDJ Electronic Inc., США). Фазовые превращения минералов после радиационно-термической обработки потоком высокоэнергетических электронов определялись с помощью рентгеноструктурного анализа.

Установлено, что при достижении максимальной температуры 400°С под действием обработки пучком ускоренных электронов удельный магнитный момент минералов увеличивается: в 57 раз для пирита с размерами частиц 75–180 мкм, в 43 раза для пирита крупностью 53–75 мкм, в 291 раз для арсенопирита крупностью 53–75 мкм, в 921 раз для арсенопирита с величиной зерен менее 53 мкм, в 9.7 раза для халькопирита с размерами частиц 75–180 мкм. При этом величина удельного магнитного момента минералов зависит как от температуры, так и от крупности обрабатываемых частиц сульфидов.

Так для необработанного пирита с размерами частиц 75–180 мкм удельный магнитный момент составлял $0.1846 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{г}$, а для обработанного до $400^{\circ}\text{C} - 10.52 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{г}$, т.е. магнитный момент увеличился в $10.52 \cdot 10^{-8}/0.1846 \cdot 10^{-8} \approx 57$ раз; для пирита размерами частиц крупностью 53–75 мкм удельный магнитный момент изменился от $0.418 \cdot 10^{-8}$ до $18.134 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{г}$, т.е. в 43 раза.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали появление в обработанных пучком ускоренных сульфидных минералах магнитных фаз в виде Fe_2O_3 , γ - Fe_2O_3 и Fe_3O_4 в разных сочетаниях, тогда как при обычном нагревании фиксируется образование только одной фазы Fe_3O_4 (рисунок). Изменения магнитных свойств облученных минералов зависят как от содержания указанных магнитных фаз, так и от крупности образцов.

Эти данные согласуются и с результатами физико-химического моделирования процессов, происходящих в системе железо–сера–кислород. В табл. приведены результаты расчетов возможных реакций для этой системы, а на рис. показана диаграмма возможных соединений в ней. Анализ приведенных в таблице данных показывает, что скорость реакций (1), (3) и (4) с увеличением температуры возрастает. При радиационно-термической обработке пирита фазовый переход происходит значительно быстрее даже при более низких температурах, вероятно, вследствие дополнительного сопутствующего электронам действия образующегося озона (O₃), для которого характерны более сильные окислительные свойства, чем для кислорода.



Рис. Рентгенограммы пирита (слева): исходного (**a**), обработанного в печи при температуре 300 °C (**б**) и обработанного ускоренными электронами в радиационно-термическом режиме при той же температуре (**b**) и результаты физикохимического моделирования системы Fe–S–O при температуре 500 °C и 1 атм. общего давления (справа)

Таблица

	ТЕМПЕРАТУРА, °С					
ВОЗМОЖНЫЕ РЕАКЦИИ	25		300		500	
	$\Delta Z_{p, K \kappa a \pi}$	lgK	$\Delta Z_{p, K \kappa a \pi}$	lgK	$\Delta Z_{p, K \kappa a \pi}$	lgK
$3 Fe + 2O_2 = Fe_3O_4 $ (1)	- 242.7	177.9	- 256.3	187.9	- 270.5	198.3
$2Fe_3O_4 + 1/2O_2 = 3Fe_2O_3$ (2)	- 46.9	34.4	-45.2	33.1	- 44.1	32.3
$Fe + S_2 = FeS_2 \qquad (3)$	- 38.9	28.5	-41.6	30.5	- 44.6	32.7
$Fe_3O_4 + 3S_2 = 3FeS_2 + 2O_2$ (4)	126.0	- 92.4	124.5	- 91.3	122.9	- 90.1
$Fe_2O_3 + 2S_2 = 2FeS_2 + 3/2O_2$ (5)	99.6	- 73.1	98.1	- 71.9	96.7	- 70.9

Результаты физико-химического моделирования системы Fe-S-O при различных температурах и 1 атм. общего давления

Исследования поведения в аналогичных условиях галенита и сфалерита – основных компонентов полиметаллических и других упорных руд – показали отсутствие существенных изменений в их структуре.

Используя разницу в поведении различных сульфидных минералов в сложных по вещественному составу упорных рудах после их радиационнотермической обработки пучком ускоренных электронов можно управлять технологическим процессом их обогащения, добиваясь при этом высоких показателей разделения.

Одним из ярких примеров использования радиационно-термической обработки является возможность разделения оловянных продуктов, содержащих арсенопирит. Установлено, что обработка пучком ускоренных электронов сульфидно-мышьяковистых оловянных концентратов позволяет интенсифицировать процесс их последующей магнитной сепарации. При этом в магнитную фракцию извлекается более 70% железа и около 90% мышьяка.

Таким образом, использование радиационно-термической обработки позволяет направленного изменять магнитные свойства железосодержащих минералов, что создает предпосылки для создания эффективных, экологически чистых технологий переработки комплексных руд сложного состава и продуктов их обогащения с применением энергетических воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В.А. Прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья. / Материалы Международного совещания «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2014)». – Алматы, 16-19 сентября. 2014 г. – С. 5 – 6.

2. Плаксин И.Н., Шафеев Р.Ш., Чантурия В.А., Якушкин В.П. О влиянии ионизирующих излучений на флотационные свойства некоторых минералов. / Обогащение полезных ископаемых. Избранные труды. – М.: Наука, 1970. – С. 292–300.

3. Ростовцев В.И. Об эффекте интенсифицирующих энергетических воздействий на процессы переработки труднообогатимого минерального сырья. // Сборник материалов Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология», Т.4. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 163–168.

4. Бочкарев Г.Р., Ростовцев В.И. О роли энергетических воздействий при переработке минерального сырья. / Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – № 1. – Т. 2, С. 199–206.

5. 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.

6. Ванг Х., Бочкарев Г.Р., Ростовцев В.И., Вейгельт Ю.П., Лу С.С. Повышение магнитных свойств железосодержащих минералов при радиационно-термической обработке // ФТПРПИ. – 2004. – № 4.

7. 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.

© В. И. Ростовцев, 2015

СТЕНД ТРЕХОСНОГО НЕЗАВИСИМОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Екатерина Владимировна Рубцова

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

В статье описана конструкция стенда, предназначенного для выполнения тестов измерительного гидроразрыва в модельных образцах размерами 200 × 200 × 200 мм при их неравнокомпонентном нагружении. Обозначены задачи предстоящих исследований на стенде.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, физическое моделирование, стенд, скважина, трещина, давление, оценка напряженного состояния.

THREE-AXIAL INDEPENDENT LOADING BENCH FOR PHYSICAL MODELING OF HYDRAULIC FRACTURING FOR STRESS MEASUREMENT

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 paper describes the test bench for implementation of hydraulic fracturing for measuring stresses in model specimens $200 \times 200 \times 200$ mm exposed to nonequicomponent loading. Objectives of upcoming bench testing are specified.

Key words: hydraulic fracturing for stress estimation, physical modeling, test bench, hole, crack, pressure, stress state assessment.

Метод классического измерительного гидроразрыва для оценки напряжений в массиве скальных горных пород известен с конца шестидесятых годов двадцатого века. К настоящему времени выполнен большой объем исследований, направленных на развитие методических подходов и создание технических средств для практической реализации метода, в том числе в ИГД СО РАН [1, 2]. Предложены модификации метода, в частности, так называемый «сухой» гидроразрыв, обеспечивающий оценку напряженного состояния проницаемых горных пород [3]. Вместе с этим в классическом измерительном гидроразрыве остаются вопросы, требующие дальнейших исследований, направленных, в первую очередь, на обеспечение достоверности метода.

Так, важным элементом методики измерительного гидроразрыва является выбор способа интерпретации экспериментальных данных гидроразрыва при определении компонент действующих в массиве напряжений. В классической схеме действующие в массиве напряжения оцениваются по давлению «запира-

ния» трещины гидроразрыва после прекращения подачи рабочей жидкости в межпакерное пространство и давлению открытия трещины при повторном нагружении. Точность определения этих давлений по экспериментальным диаграммам существенно влияет на достоверность метода.

Наиболее спорным остается вопрос об определении момента «запирания» («схлопывания») берегов трещины. В [4, 5] описываются способы, которые практики гидроразрыва используют для определения величины давления «запирания» трещины, констатируется, что известные способы основаны на теоретических моделях, ни одна из которых не является строго разработанной или проверенной, что подтверждает актуальность дальнейших исследований в этом направлении.

Решение вопросов повышения достоверности тестов измерительного гидроразрыва, в том числе, обоснование способов интерпретации экспериментальных данных, может осуществляться методом физического моделирования процесса гидроразрыва на модельных образцах с использованием макетов скважинных зондов. Для этих целей в лаборатории горной информатики ИГД СО РАН спроектирован стенд трехосного независимого нагружения (рис. 1).



Рис. 1. Стенд для физического моделирования процесса измерительного гидроразрыва (проект)

Стенд смонтирован на плите 1 пресса ПГ 100 (рис. 2). Испытываемый образец 2 из полиметилметакрилата кубической формы размерами 200×200×200 мм с заранее выполненной скважиной, в которой предусмотрена установка макета зонда, располагается на подставке 3. Силовая рама, состоящая

из трех сопряженных рычагов 4, монтируется на платформе 5 с помощью болтов 6. В силовой раме расположены четыре гидравлических домкрата 7 (ДН10П10) грузоподъемностью 10 тс, предназначенные для сжатия образца по двум ортогональным направлениям в горизонтальной плоскости. Пятый домкрат 8 служит для нагружения образца по вертикальной оси. Усилия сжатия на образец передаются от домкратов через опорные площадки 9 и прокладки из фторопласта 10.



Рис. 2. Стенд в рабочем состоянии: 1 – плита пресса; 2 – образец кубической формы; 3 – подставка; 4 – рычаг; 5 – платформа; 6 – болт; 7, 8 – гидравлические домкраты; 9 – опорные площадки; 10 – прокладки из фторопласта

Для управления работой гидравлических домкратов, зонда в «скважине» и регистрации экспериментальных данных разработана схема, представленная на рис. 3. Данная схема позволяет переключением распределительных устройств и запорных кранов осуществлять независимое трехосное нагружение

образца и выполнять в нём тест гидроразрыва при помощи макета скважинного зонда. Для обработки и визуализации процесса изменения давления при выполнении гидроразрыва использованы устройство преобразования и передачи данных на основе унифицированных модулей ADVANTEC и программное обеспечение, разработанное в среде графического программирования «LabView» [5].



Рис. 3. Схема нагружения и регистрации экспериментальных данных: 1 – насос; 2 – краны запорные; 3, 4 – распределители; 5 – манометр; 6 –трубопроводы высоконапорные; 7 – домкраты; 8 – испытываемый образец; 9 – преобразователь давления МИДА-ДИ-51П; 10 – кабель связи; 11 – устройство преобразования и передачи данных; 12 – портативный компьютер

Реализованная конструкция стенда и система нагружения позволяют проводить тесты гидроразрыва в образцах из полиметилметакрилата при их неравнокомпонентном нагружении. Программа физического моделирования на стенде предусматривает на первом этапе: исследование и сравнительный анализ способов определения момента «запирания» («схлопывания») берегов трещины при одноосном, двухосном и трехосном нагружении образцов; выполнение тестов направленного гидроразрыва скважины с предварительно созданной на ее контуре зародышевой трещиной и оценку влияния параметров зародышевой трещины на достоверность оценки напряжений.

Результаты физического моделирования на стенде станут основой дальнейшего совершенствования разработанного в ИГД СО РАН измерительновычислительного комплекса «Гидроразрыв» [5], применяемого в настоящее время для оценки напряженного состояния горных пород в шахтных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород. // ФТПРПИ. – 1994. – № 1. – С. 3–20.

2. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва. / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 188–191.

3. Павлов В.А., Янкайте А.В., Сердюков С.В. Развитие метода гидроразрыва применительно к оценке напряженного состояния проницаемых горных пород. // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2009. – № 12. – С. 248–255.

4. Aggson J. R., Kim K. Technical Note-Analysis of Hydraulic Fracturing Pressure Histories: A Comparison of Five Methods Used to Identify Shut-In Pressure. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1987. – Vol. 24, pp. 75–80.

5. Zhao J., Hefny A.M., Zhou Y.X. Hydrofracturing in situ stress measurements in Singapore granite. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. –2005. – Vol. 42, issue 4, June, pp. 577–583.

6. Леонтьев А.В., Рубцова Е.В., Леконцев Ю.М., Качальский В.Г. Измерительновычислительный комплекс «Гидроразрыв». // ФТПРПИ. – 2010. – № 1. – С. 104–110.

© Е. В. Рубцова, 2015

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ И МЕТОДИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СКВАЖИННОГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДЕГАЗАЦИИ

Леонид Алексеевич Рыбалкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Валерий Всеволодович Сказка

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, тел. (383)335-96-42, e-mail: skazka@math.nsc.ru

Сергей Владимирович Сердюков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

В статье приведены результаты исследования вибрационного воздействия скважинного дебалансного источника. Разработана математическая модель излучения скважинного дебалансного источника в ближней зоне, проведены численные исследования, по результатам которых установлено, что для обеспечения требуемой интенсивности воздействия, в обрабатываемом объеме углепородного массива, вибрационное воздействие должно осуществляться в режиме меняющейся во времени частоты вибрации. Разработан прототип технических решений по вибрационному воздействию на угольный пласт.

Ключевые слова: вибровоздействие, дегазация, метан угольных пластов.

EQUIPMENT AND PROCEDURES OF DOWNHOLE VIBRATION STIMULATION OF GAS DRAINAGE

Leonid A. Rybalkin

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

Valery V. Skazka

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, tel. (383)335-96-42, e-mail: skazka@math.nsc.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 Rock Mass Stimulation Methods, tel. (383)335-96-42, e-mail: ss3032@yandex.ru

The article reports the research findings on vibration impact generated by down hole unbalance source. The authors have modeled mathematically the down hole unbalance vibration source action in the near-field range and performed numerical analysis that shows the required efficiency of the vibration effect on coal and rock mass needs the time-varying frequency of vibration generation. The prototype equipment for vibration effect on coal bed has been designed.

Key words: vibration impact, gas drainage, coal bed methane.
Интенсификация десорбции метана, для повышения эффективности и степени дегазации углепородного массива, предполагает применение различных технологии по повышению проницаемости угольных пластов, например гидроразрыв пласта. Однако применение таких технологий не всегда приводит к заметному увеличению проницаемости, одной из причин является блокировка метана в микротрещинах и порах капиллярным давлением воды после образования депрессии. В связи с этим, необходимо применять и другие технологии для увеличения газоотдачи угольных пластов.

Перспективным методом интенсификации десорбции и фильтрации углеметана является вибрационное воздействие на неразгруженные угольные пласты низкочастотными сейсмическими полями, возбуждаемыми скважинными источниками [1].

В Институте горного дела СО РАН проведены математическое моделирование и численные исследования скважинного вибрационного источника дебалансного типа с целью оптимизации режимов работы вибросейсмического излучателя, для обеспечения высокой удельной мощности упругих колебаний в обрабатываемом объеме углепородного массива, а так же разработан прототип технических решений по вибрационному воздействию на угольный пласт.

В расчетах использованы следующие параметры среды: плотность $\rho = 2100 \text{ кг/m}^3$, скорости продольных и поперечных волн $V_P = 2400 \text{ м/c}$, $V_S = V_P / \sqrt{3}$, радиус скважины $R_0 = 0.084 \text{ м}$.

Математическая модель показана на рис. 1 [2]. Амплитуда смещения частиц среды в волновом поле на расстоянии r=20 метров от скважины при вращении дебаланса с круговой частотой 70Гц, в зависимости от положения точки наблюдения по оси, показана на рис. 2. Графики максимальных амплитуд вектора смещений частиц среды в волновом поле на расстояниях r=1, 10, 20 м, а также графики значения z при котором этот максимум достигается в зависимости от частоты вращения дебаланса показаны на рис. 3.



Рис. 1. Модель силового воздействия, приложенного ортогонально, дебалансного скважинного источника, имеющего конечные размеры по оси скважины (ось z)



Рис. 2. График амплитуды смещения среды в волновом поле в зависимости от положения точки наблюдения по оси *z* при *r*=20м, ω=70 Гц



Рис. 3. Графики максимальной амплитуды вектора смещения частиц среды $\|U\|_{t,z}$ при *r*=20м в волновом поле (а) и положения этого максимума по оси z (б) от круговой частоты вращения дебаланса

Приведенные на рис. 3 графики показывают сильную пространственную изменчивость интенсивности вибрационного воздействия в ближней зоне дебалансного источника и ее значительную зависимость от частоты генерируемых колебаний.

Из полученных результатов следует, что при амплитуде силы 15 кН и частоте вибрации 100Гц амплитуда смещения частиц среды на расстоянии 10 м от источника составит около 10^{-7} м, что для заданных свойств среды соответствует интенсивности воздействия 0,01 Вт/м². Радиус охвата углепородного массива вибрационным воздействием составит 30–40 м (рис. 2).

Результаты экспериментальных исследований, представленные в [3], показывают, что для значимого повышения проницаемости среды по газу и жидкости, интенсивность вибрационного воздействия должна быть не ниже 0.01 Вт/м², а частота колебаний лежать в диапазоне 150 – 300 Гц (рис. 4).



Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований эффективности вибрационного воздействия на массив флюидонасыщенных горных пород скважинным дебалансным источником DHVT

При разработке экспериментального образца дебалансного скважинного источника за основу выбрана конструкция прижимного электромеханического узла скважинного сейсмического прибора АМЦ-ВСП-3-48М производства ОАО НПП ВНИИГИС (г. Октябрьский) (рис. 5).

Прижимной узел прибора АМЦ-ВСП-3-48М обеспечивает закрепление прибора в скважинах диаметром 59 – 320 мм с максимальным усилием на внешнем конце рычага 850 Н. Внешний конец рычага был дополнительно снабжен шарнирно соединенной контактной площадкой увеличенной площади. В качестве привода виброисточника, мощностью 120 – 500 Вт, может использоваться пневмодвигатель вращательного движения. Возможным вариантом привода в диапазоне частот до 300Гц является пневмомотор PHR компании Ober (Италия).



Рис. 5. Скважинный прибор АМЦ-ВСП-3-48М с выдвинутым рычагом электромеханического прижимного устройства в скважине [18]

Частота вибрационного воздействия меняется в процессе работ, по линейному закону (режим ЛЧМ). Что в свою очередь позволяет равномерно и последовательно охватывать обрабатываемую область углепородного массива (ближняя зона дебалансного скважинного источника) с интенсивностью воздействия не менее 0,01 Вт/м².

Частотный диапазон, для регулирования кинетического момента дебалансного вибратора с целью соблюдения ограничений по диапазону амплитуды вибротяговой силы, был разделен на два поддиапазона равной ширины 100–173 Гц и 173–300 Гц.

На рис. 6 показана принципиальная схема разработанного вибрационного оборудования. Оно состоит из пульта, соединительных линий и скважинного устройства, содержащих пневматическую и электрическую части.

В результате исследований разработана математическая модель излучения скважинного дебалансного источника в ближней зоне, проведены численные исследования по результатам которых установлено, что для обеспечения требуемой интенсивности воздействия 0,01 Вт/м² и более в обрабатываемом объеме углепородного массива, вибрационное воздействие должно осуществляться в режиме меняющейся во времени частоты вибрации в диапазоне частот 100–173 Гц и 173–300 Гц.

Перспективным направлением исследований является комбинированный способ вибровоздействия и метода направленного ГРП, что позволяет повысить эффективность интенсификации дегазации за счет создания устойчивой фильтрационной связи между стволом дегазационной скважины и угольным массивом.



Рис. 6. Принципиальная схема вибрационного скважинного оборудования для воздействия для интенсификации предварительной дегазации.

Условные обозначения: MH – манометр; BH – газовый вентиль; KP – клапан редукционный; ДP – дроссель регулируемый; $Б\Pi$ – блок электрического питания; $K\pi$ – электрический переключатель; ΠM – пневмомотор; M – электродвигатель узла электромеханического прижима; $P\Pi$ – рычаг прижимной, $B\Pi$ – винтовая пара; $\Pi\Pi$ – планетарная передача (редуктор); 4M – частотомер; \mathcal{AC} – датчик сейсмических колебаний; wl – воздуховод (гибкий шланг) внутренним диаметром 6–8 мм; κl – электрический одножильный бронированный кабель

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект RFMEFI60414X0096.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Сердюков С.В. Реакция флюидов нефтепродуктивного пласта на вибросейсмическое воздействие малой интенсивности // ФТПРПИ. – 1999. – № 2. – С. 11–17.

2. Сказка В.В., Сердюков С.В., Ерохин Г.Н., Сердюков А.С. Анализ ближней зоны излучения сейсмического источника, действующего вдоль оси скважины // ФТПРПИ. – 2013. – №1. – С. 70–78.

3. Westermark R., Brett J. F. Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation in Osage County Oklahoma: Final Report // July 13, 2000 – June 30, 2003. – DOI: 10.2172/822922.

© Л. А. Рыбалкин, В. В. Сказка, С. В. Сердюков, 2015

СОЗДАНИЕ СКВАЖИННЫХ ДЕБАЛАНСНЫХ ВИБРОИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ^{*}

Андрей Владимирович Савченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Юрий Валентинович Погарский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Евгений Николаевич Чередников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (383)335-94-45

Приведена конструктивная схема скважинного виброисточника гармонических колебаний с регулируемой частотой, определены технические характеристики и показана перспективная область его применения.

Ключевые слова: скважинный дебалансный виброисточник, гармонические колебания, изменение частоты воздействия.

DOWNHOLE IMBALANCE VIBRATION SOURCES FOR OIL RECOVERY STIMULATION

Andrey V. Savchenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Impulse-Forming Systems, tel. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Yuri V. Pogarsky

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

Evgeny N. Cherednikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Impulse-Forming Systems, tel. (383)335-94-45

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований №№ 15-05-08824а и 14-05-31395-мол а.

The paper presents structural layout of downhole adjustable-frequency source of harmonic vibrations, its technical characteristics and promising area of application.

Key words: downhole imbalance vibration source, harmonic vibrations, frequency variation.

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 интенсификации добычи нефти с применением наземных и скважинных виброисточников.

Существенным недостатком наземных виброисточников является большое затухание излучаемой энергии в толще горных пород. Наиболее перспективными, среди известных источников волновых воздействий, являются скважинные системы. Однако часто их область применения ограничена глубиной спуска генератора, так для скважинных гидроударных систем максимальное погружение в скважину составляет 1400 м и ограничено прочностью штанг. Также необходимым требованием для погружных систем является наличие на устье скважины привода генератора – станка-качалки установленного на специальный фундамент.

В ИГД СО РАН разработан скважинный виброисточник дебалансного типа [1], приводом для которого предлагается использовать герметизированный низкочастотный электродвигатель (рис. 1). Созданный генератор может применяться для кратковременных обработок призабойной зоны пласта или ввода скважин в эксплуатацию. Совместное расположение генератора и погружного электродвигателя позволяет охватить воздействием скважины большой глубины. Виброисточник размещается в скважине на глубине залегания продуктивного пласта и обладает возможностью регулирования частоты излучаемых колебаний с целью обеспечения оптимальных параметров воздействия на призабойную зону. Обладая высокими энергетическими показателями, такие источники отличаются возможностью быстрой практической реализации.

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

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 и служат для очистки призабойной зоны пласта.

Благодаря совмещенному расположению в скважине виброисточника и герметизированного электродвигателя, появилась возможность охватывать скважины большей глубины и размещать генератор на уровне перфорации, что позволило оказывать направленное воздействие непосредственно на призабойную зону.

Таблица 1



Технические характеристики для блока из шести модулей

1. Габариты	
1.1 Длина, мм	3150
1.2 Диаметр, мм	140
2. Bec, кг	246
	 Габариты Габариты Длина, мм Диаметр, мм Вес, кг

3. Диапазон рабочих частот, Гц/(об/мин) 6/(360)...20/(1200)

4. Амплитуда возмущающей силы вибрации:

на частотах кгс

6 гц	156
8 гц	276
10 гц	432
12 гц	624
14 гц	852
16 гц	1110
18 гц	1404
20 гц	1734

5. Потребляемая мощность, кВт 9,9

жинного виброисточника с электродвигателем

і обсадна

Рис. 1. Компоновка сква- Рис. 2. Комплект виброблоков, установленных в скважине

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 147788 РФ. Скважинный сейсмический вибратор. / Б.Ф. Симонов, Ю.В. Погарский, А.В. Савченко // Опубл. в БИ 20.11.2014. – №32.

© А. В. Савченко, Ю. В. Погарский, Е. Н. Чередников, 2015

О ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ С ФОРМИРОВАНИЕМ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Виктор Михайлович Серяков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, заведующий лабораторией, доктор технических наук, тел. (383)217-01-52, e-mail: vser@misd.nsc.ru

Проведен расчет напряженно-деформированного состояния массива горных пород, формирующегося при отработке пластовых месторождений, с учетом разрушения подработанной толщи и ее обрушения в выработанное пространство. Показано, что интенсификация процесса разрушения подработанной толщи с возможным развитием обрушения пород до земной поверхности определяется формированием в окрестности земной поверхности зоны растягивающих напряжений и достижением в ней напряжениями предельных значений.

Ключевые слова: породный массив, напряжения, деформации, разрушение, обрушение, зоны растяжения, пределы прочности.

INTERACTION BETWEEN UNDERMINED ROCK MASS FAILURE AND FORMATION OF FRACTURED ZONES NEAR THE EARTH SURFACE

Victor M. Seryakov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Prof, Head of Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)217-01-52, e-mail: vser@misd.nsc.ru

The authors calculates stresses and strains induced in rock mass by sheet deposit mining, considering damage of undermined formation and its fall in the mined-out void. It is shown that intensification of damage and its propagation up to the earth surface is conditioned by formation of zone of ultimate tensile stresses in the vicinity of the earth surface.

Key words: rock mass, stress, strain, fracture, fall, tensile zone, ultimate stress limit.

Теоретическое моделирование процесса деформирования и разрушения породного массива позволяет прогнозировать характер перераспределения напряжений в ходе ведения горных работ, устанавливать закономерности разрушения подработанных и надработанных пород в различных горнотехнических условиях, определять основные факторы, влияющие на интенсивность деформирования и разрушения вмещающего массива [1,2]. При отработке пластовых месторождений без закладки выработанного пространства основным элементом технологии выемки является обрушение подработанных пород в очистное пространство [3-6]. В ИГД СО РАН на основе метода конечных элементов разработаны алгоритмы и программы, с помощью которых возможен расчет напряженно-деформированного состояния вмещающего массива с учетом обрушения подработанных пород [7,8]. Обрушение моделируется обращением в ноль всех компонент тензора напряжений в конечных элементах на контуре выработанного пространства, в которых выполняется условие разрушения пород. Использование для выполнения этого условия метода начальных напряжений [9,10] позволило на всех этапах расчета разрушения использовать одну и ту же матрицу жесткости, формируемую для нетронутого горными работами породного массива.

Для большинства пластовых месторождений характерны значительные площади отработки и сравнительно небольшая глубина ведения очистных работ. В этих условиях подземная отработка пластовых месторождений оказывает влияние на породы, лежащие вблизи земной поверхности: происходят большие оседания непосредственно над районами отработки, на некотором удалении от мульды сдвижения могут формироваться зоны трещин и т.п. Представляет особый интерес рассмотреть процессы деформирования и разрушения породного массива в окрестности выработанного пространства, расположенного на небольшой глубине отработки, с учетом влияния земной поверхности.

Для установления основных особенностей характера деформирования и разрушения подработанного массива, перераспределения напряжений в налегающих породах рассмотрен случай деформирования однородной среды при выемке горизонтально залегающего пласта полезного ископаемого. Пласт залегает на глубине — 250 м; его мощность — 4 м. Ширина очистного пространства – 100 м. Расчеты выполнены для условий плоской деформации, справедливых в случае значительных размеров очистного пространства в направлении, перпендикулярном рассматриваемому сечению массива.

На боковых границах расчетной области заданы нулевые значения горизонтальной компоненты вектора смещений *и* и касательной компоненты тензора напряжений τ_{xy} . Эти условия отвечают исходному напряженному состоянию массива с компонентами тензора напряжений: $\sigma_y^0 = \wp H$; $\sigma_x^0 = v \wp H/(1-v)$; $\tau_{xy}^0 = 0$, и реализуются в регионах, где отсутствует тектоника[8]. Здесь σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 - нормальные и касательная компоненты тензора напряжений; \wp - объемный вес пород; H – расстояние до земной поверхности. Ось Ox направлена по горизонтали, Oy — по вертикали. Верхняя граница расчетной области свободна от действия внешней нагрузки. На нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора смещений *v* и касательная компонента тензора напряжений τ_{xy} . Механические свойства вмещающих пород приняты следующими: модуль Юнга E = 25000 МПа; v = 0.25. Для отрабатываемого пласта E = 3000 МПа; v = 0.35. Объемный вес пород равен 0.03 МН/м³.

Итерационный процесс нахождения упругопластического решения можно рассматривать как последовательное развитие разрушения подработанного массива. Время разрушения пород в зонах предельного состояния может быть введено путем применения одного из критериев накопления повреждений [11]. В рассматриваемом случае обсуждаются лишь вопросы характера разрушения подработанного массива.

На рис. 1 приведены изолинии распределения главных напряжений в окрестности выработанного пространства после выполнения 50 шагов итераци-

онного процесса при значении предела прочности на растяжение 3 МПа. На этом же рисунке показаны области обрушения налегающих пород, а также зоны формирования растягивающих напряжений над выработанным пространством и в окрестности земной поверхности, в которых превышены пределы прочности пород на растяжение. Необходимо отметить, что процесс обрушения рассматривается в идеализированной постановке: предполагается, что породы при обрушении не изменяют своего объема, т.е. не разрыхляются. Обрушение на рис. 1 охватывает значительный объем пород над выработанным пространством. Обращает на себя внимание область разрушения пород в окрестности земной поверхности.





Рис. 1. Распределение главных напряжений σ_1 (*a*) и σ_2 (*б*) [МПа] в окрестности выработанного пространства после выполнения 50 шагов итерационного процесса: І– область обрушения пород над выработанным пространством; ІІ– зоны формирования растягивающих напряжений в окрестности выработанного пространства и разрушения в окрестности земной поверхности

На рис. 2, показано окончательное упругопластическое решение, учитывающее процесс обрушения налегающих пород и разрушение массива в окрестности выработанного пространства. При принятых условиях расчета обрушение развивается до земной поверхности. Получает пространственное развитие и зона разрушенных пород в окрестности земной поверхности.





Рис. 2. Распределение главных напряжений $\sigma_1(a)$ и $\sigma_2(\delta)$ [МПа] в окрестности выработанного пространства после проведения 100 итераций

На заключительных шагах расчета на земной поверхности формируется ряд изолированных друг от друга трещин.

Для оценки степени влияния разрушения горных пород вблизи земной поверхности на процесс обрушения подработанной толщи выполнен расчет напряженного состояния массива при упругом деформировании приповерхностных пород. Для реализации таких условий пределы прочности на растяжение горных пород, лежащих в окрестности земной поверхности, выбраны такими, чтобы их значения не достигались ни в одной точке этой части расчетной области. На рис. 3 показан окончательный вид области обрушения и распределение в окрестности выработанного пространства главных напряжений. Зона обрушения занимает часть подработанного массива и не развивается до земной поверхности.





Рис. 3. Конфигурация зоны обрушения пород над выработанным пространством и распределение главных напряжений $\sigma_1(a)$ и $\sigma_2(b)$ [МПа] в окрестности выработанного пространства в случае отсутствия разрушения вблизи земной поверхности

Для более детального анализа влияния разрушения приповерхностных пород на характер деформирования подработанной толщи рассмотрен вариант, в котором предел прочности приповерхностных пород был взят 5 МПа, т.е. почти в два раза больше, чем в первом расчете. На рис. 4 показано окончательное упругопластическое решение, полученное в результате применения итерационного процесса.

Несмотря на формирование в окрестности земной поверхности зоны разрушения за счет проявления растягивающих напряжений, обрушение пород над выработанным пространством не развивается вглубь массива до земной поверхности. Можно сделать вывод, что при данной ширине выработанного пространства существует величина предела прочности приповерхностных пород на растяжение, при которой процесс обрушения вмещающего массива в выработанное пространство может развиться до земной поверхности. При принятых условиях расчета эта величина около 4 МПа.



Рис. 4. Характер разрушения подработанных пород и распределения главных напряжений $\sigma_1(a)$ и $\sigma_2(\delta)$ [МПа] в окрестности выработанного пространства при залегании вблизи земной поверхности пород повышенной крепости

Тот факт, что определяющую роль в интенсификации процесса обрушения пород в выработанное пространство играет разрушение приповерхностных пород, подтверждает и расчет процесса деформирования массива при следующих параметрах расчета: предел прочности пород над выработанным пространством 5 МПа, в приповерхностном слое на некотором удалении от района ведения очистных работ 1 МПа. При таких механических параметрах расчета разрушение и обрушение вмещающих пород над очистным пространством развивается до земной поверхности (рис. 5).



Рис. 5. Характер разрушения подработанных пород и распределения главных напряжений $\sigma_1(a)$ и $\sigma_2(b)$ [МПа] в окрестности выработанного пространства при залегании над выработанным пространством пород повышенной крепости

Выводы.

1. При отработке пластовых месторождений, залегающих на относительно небольшой глубине, для каждого значения ширины выработанного пространства существует величина предела прочности приповерхностных пород на растяжение, при которой происходит интенсификация процесса обрушения вмещающих пород в выработанное пространство с возможным развитием его до земной поверхности.

2. Пределы прочности пород на растяжение над выработанным пространством, при которых процесс обрушения налегающей толщи развивается до земной поверхности, могут быть в два раза больше соответствующих пределов горных пород, залегающих вблизи земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука. – 2005.

2. Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвижение и разрушение горных пород. – М.,: Наука. – 2005.

3. Сдвижение горных пород и земной поверхности. – М.: Углетехиздат. – 1958.

4. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра. – 1980.

5. Фармер Я. Выработки угольных шахт. – М.: Недра. – 1990.

6. Ягунов А.С. Динамика деформаций в подрабатываемом массиве. – Кемерово: Кузбассвузиздат. – 2010.

7. Серяков В.М. К расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород над выработанным пространством. // ФТПРПИ. – 2009. – № 5.

8. Серяков В.М. Об одном способе учета реологических свойств горных пород при расчете напряженно-деформированного состояния массива в зоне подработки. // ФТПРПИ. – 2010. – № 6.

9. Зенкович О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир. – 1975.

10. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра. – 1987.

11. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра. – 1989.

© В. М. Серяков, 2015

РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИННОГО ЗОНДА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Александр Александрович Скулкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (923)143-53-34, e-mail: chuptt@yandex.ru

Представлена новая конструкция скважинного зонда в составе измерительно-вычислительного комплекса «Гидроразрыв» с выведенной из межпакерного пространства плунжерной парой, обеспечивающая повышение надежности управления зондом как на стадии пакеровки, так и в процессе измерений.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, скважинный зонд, пакер, плунжерная пара, скважина.

NEW DESIGN OF DOWNHOLE DEVICE FOR HYDRAULIC FRACTURING FOR STRESS MEASUREMENT

Alexander A. Skulkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, tel. (923)143-53-34, e-mail: chuptt@yandex.ru

The author presents a new design of a downhole device being a part of the measurement and computation equipment Gidrorazryv, with the pump element put out from the interpacker space, ensuring higher reliability control of the downhole device both in setting of packers and in taking measurements.

Key words: hydraulic fracturing for stress measurement, hydrofracturing device, packer, pump element, hole.

Известны технологии гидроразрыва нефтяных пластов с помощью трещин направленной ориентации. В частности, так называемый ориентированный гидроразрыв используется для управления труднообрушаемой кровлей при отработке угольных пластов. При этом в скважинах заранее производится механическое ослабление их контурной зоны.

Параллельно появилось предложение использовать данную технологию в методе измерительного гидроразрыва при определении in-situ действующих в массиве напряжений [1].

В методе измерительного гидроразрыва при использовании в качестве рабочего тела жидких флюидов (масло, суспензия, спиртовый раствор глицерина) можно отметить ряд негативных моментов, сдерживающих его эффективное применение. Прежде всего, это непредсказуемое развитие трещины гидроразрыва. Неоднородности на поверхности скважины, а также в массиве, определяют направление ее зарождения и дальнейшее распространение в породной среде. Также, возможно проявление эффекта «обыгрывания» пакеров, когда трещина развивается вдоль оси скважины и выходит за пределы пакера.

Вероятность проявления последнего эффекта была обнаружена в серии лабораторных испытаний макетов измерительного зонда при гидроразрыве кубических образцов из полиметилметакрилата (оргстекло) [2]. Макеты зондов, при этом, воспроизводили работу его реальной конструкции (рис. 1).



Рис. 1. Двухпакерный зонд измерительно-вычислительного комплекса «Гидроразрыв»: 1 – пакерные элементы, 2 – распорный гидроцилиндр

На первой стадии работы по совершенствованию конструкции измерительного зонда в составе разработанного в ИГД СО РАН измерительно-вычислительного комплекса «Гидроразрыв» (ИВК «Гидроразрыв») были направлены на преодоление отмеченного недостатка. Вариант новой конструкции зонда представлен на рис. 2. Зонд состоит из двух полых стяжек, соединенных в центре стыковым штуцером с отверстием для выхода рабочего флюида в межпакерную область. На концевых частях стяжек расположены пакерные элементы, разделенные втулками, и распорные гидроцилиндры.



Рис. 2. Двухпакерный измерительный зонд в составе комплекса ИВК «Гидроразрыв»:

стяжка; 2 – адаптер подачи рабочего флюида; 3 – распорный гидроцилиндр;
 4 – ограничитель концевой; 5 – пакер; 6 – втулка разделитель; 7 – штуцер стыковой;
 8 – трубка; 9 – штуцер; 10 – кольцо уплотнительное; 11 – штуцер под досылочное устройство (трубопровод); 12 – скоба прижимная; 13 – шайба сферическая; 17–21 – стандартные изделия

В лабораторных испытаниях новой конструкции на специально созданном стенде, имитировавшим измерительную скважину, преследовались следующие цели:

 – поиск материала и формы пакерных элементов, а также схемы их взаимного размещения с распорными гидроцилиндрами, которые за счет сжатия приводят пакера в соприкосновение со стенками скважины;

- выбор и обоснование линейных размеров пакерных элементов;

 проверка работоспособности новой конструкции и выявление недостатков ее отдельных элементов.

При обосновании линейных размеров пакерных элементов были использованы результаты численного моделирования характера развития трещины гидроразрыва, полученные А.А. Зиновьевым [3]. Моделирование формы трещины при различных соотношениях длины межпакерной зоны L (интервал нагружения) и длины пакеров l показало, что при соотношении L/l=1,33 фронты односторонней трещины, ортогональные оси скважины, не достигают середины пакера, а при L/l=2 трещина развивается далее, чем середина пакера (рис. 2). В целях уменьшения вероятности эффекта «обыгрывания» пакера при расчете

линейных размеров пакерных элементов в новой конструкции зонда за основу принято соотношение L/l=1,33. В соответствие с американским стандартом ASTM D4645-04 [4] длина межпакерной зоны L (интервала нагружения скважины) принята равной 5d, где d – диаметр скважины. Таким образом, оптимальная пакерного элемента длина составит 3,75*d*. При стандартных (алмазное бурение) размерах измерительной скважины 59 и 76 мм соответствующие размеры элементов измерительного зонда получают значения: $L_{59} = 295$ мм, $l_{59} = 221$ мм; $L_{76} = 380$ мм, $l_{76} = 285$ мм. Общая длина зондов (с учетом длины гидроцилиндров) достигнет ориентировочно 1030 и 1300 мм, соответственно.

В процессе поиска конструктивного



Рис. 3. Результаты расчетов формы единичной трещины для случаев L/l = 1,33 (*a*) и L/l = 2 (б) (пояснения в тексте)

решения по герметизации межпакерной области было испытано ряд стандартных резиновых манжет, которые монтировались перед пакером со стороны межпакерной области. Испытания показали, что использование стандартных резиновых манжет не обеспечивает полной герметизации участка скважины. Решение найдено путем изменения формы полиуретанового пакера, а именно, созданием полуворотниковой уплотнительной манжеты на его торцевой части, обращенной в сторону межпакерной области.

Испытание данной конструкции пакерного элемента проведено в лабораторных условиях в специально созданных макетах скважины. Вначале использовался прозрачный макет из оргстекла, имитировавший участок измерительной скважины диаметром 59 мм (рис. 4). Предварительное сжатие пакера (до полного прилегания к стенкам «скважины») производилось вращением винта (рис. 4, поз. 3) с моментом 1.5 Н·м. Затем через пробку со штуцером (рис. 4, поз. 5) в «скважину» под давлением подавался флюид (тосол). На рис. 4б видно, что проникновение флюида в зону расположения пакера отсутствует.

Аналогичные испытания проведены в макете скважины из металла. В этом случае проверялась надежность работы уплотнительной манжеты при повышенном давлении. Эффект полной герметизации «скважины» подтвержден при давлении флюида до 25 МПа.

Следующей отличительной особенностью конструкции зонда явилось использование синхронного функционирования пакерующих элементов за счет приведения их в рабочее состояние однотипными гидроцилиндрами (плунжерными парами).



Рис. 4. Устройство для испытания уплотнительной (полуворотниковой) манжеты: *а* –элементы конструкции (1 – макет скважины диаметром 59 мм; 2 – пакер с манжетой; 3 – винт для предварительного сжатия пакера; 4 – ключ моментный шкальный; 5 – пробка винтовая со штуцером для подачи флюида под давлением); *б* – устройство в сборе

При этом испытаны различные варианты компоновки пакерных элементов и распорных гидроцилиндров. На рис. 5 представлена передовая часть зонда: a – распорный гидроцилиндр расположен в концевой части зонда, δ – распорный гидроцилиндр расположен со стороны межпакерной области.

Вариант б представляется предпочтительным, т.к. размещение распорных гидроцилиндров на центральном стержне в межпакерной зоне (в интервале нагружения), позволяет сократить общую длину (и вес) зонда и уменьшить объем флюида для заполнения межпакерной зоны, так как внешний диаметр гидроцилиндров меньше диаметра скважины.

Кроме того, основываясь на предыдущем опыте [2], в целях надежной герметизации участка скважины и предотвращения эффекта «обыгрывания» пакеров трещиной гидроразрыва в конструкции зонда использованы составные пакерные элементы в виде полиуретановых цилиндров с разделительными втулками между ними



Рис. 5. Варианты конструкции зонда с различным расположением распорных гидроцилиндров и пакеров (пояснение в тексте)

В планах дальнейшего совершенствования конструкции измерительного зонда предусмотрено изменение адаптера для подачи рабочего флюида по патенту РФ № 2433259 [5]. В нем последовательное сообщение внутренних каналов с напорной магистралью реализовано при помощи золотника, установленного внутри корпуса адаптера, управление которым осуществляется путем изменения давления флюида в напорном трубопроводе. Таким образом, осуществляется схема одноканального трубопровода, который одновременно служит досылочным устройством для перемещения зонда по скважине.

Таким образом, в новой конструкции измерительного зонда в составе ИВК «Гидроразрыв», реализовано ряд усовершенствований, направленных на повышение его работоспособности в части надежной герметизации области нагружения участка скважины и оптимизации его линейных размеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Развитие методических основ и технических средств измерительного гидроразрыва. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013 - № 5 – С. 188-191.

2. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Разработка элементов двухпакерного зонда для выполнения измерительного гидроразрыва. / Труды XX-ой Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. – С. 429 - 435.

3. Зиновьев А. А. Исследование влияния геометрических параметров оборудования на форму и размеры трещины гидроразрыва / Доклад на 22-ой Всероссийской конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности. – Барнаул: ИВТ СО РАН. – 2011.

4. D 4645 - 04 USA. Standard Test Method for Determination of the In-Situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method.

5. Патент РФ № 2433259. Устройство для гидроразрыва пород в скважине. / Леконцев Ю.М., Леонтьев А.В., Рубцова Е.В. – БИ. № 31, 2011.

© А. А. Скулкин, 2015

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПНЕВМОПРОБОЙНИК

Борис Николаевич Смоляницкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, заведующий отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)217-01-33, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Егор Дмитриевич Тимофеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, тел. (383)217-01-33, e-mail: yegort@mail.ru.

Рассматривается возможность автономного перемещения пробойника в грунтовом массиве, приведена конструктивная схема макетного образца АПУ.

Ключевые слова: бурение, автономный пробойник, направленное бурение.

CONTROLLABLE PNEVMOHAMMER DRILL

Boris N. Smolyanitsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng. Prof, Head of Mining and Construction Equipment Laboratory, tel. (383)217-01-33, e-mail: bsmol@misd.nsc.ru

Egor D. Timofeev

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

Under discussion is feasibility of self-dependent motion of a hammer drill in soil. Construction diagram of a self-dependent hammer drill breadboard is presented.

Key words: drilling, self-dependent hammer drill, directional drilling.

Бурение протяженных скважин – важнейшая составляющая технологий разработки месторождений полезных ископаемых как подземным, так и открытым способами. Дальнейшее развитие этого способы проходки ограничивается наличием штанг [2] для передачи породоразрушающему инструменту крутящего момента и напорного усилия.

Чтобы преодолеть эти ограничения, предлагается создать автономный проходчик. Такого рода устройств в настоящее время не существует ни в России, ни за рубежом, есть похожие аналоги, о которых мы попытаемся рассказать [1].

Для проходки скважин в не уплотняемых прочных горных породах в 1947 г. А.В. Войниловичем и Б.М. Бычковым было заявлено устройство для автоматической подачи перфоратора в скважине [3], которое отличалось размещенным в его передней части тормозом, предназначенным для предотвращения движения перфоратора в направлении от забоя. Устройство продвигалось на забой скважины под воздействием ударных импульсов, воспринимаемых породоразрушающим инструментом и корпусом с тормозом. Тормоз представлял собой разрезной пружинный цилиндр, который распирался в скважине и оставался в ней при извлечении устройства на поверхность.

Подобный принцип действия тормоза в 1958 г. был заложен в конструктивную схему бесштангового погружного перфоратора ударно-поворотного действия для проходки скважин В.И. Малышевым, А.И. Васильевым и В.И. Погодаевым [4] (рис. 1). В дополнение к нему появился еще один тормоз, расположенный в задней части корпуса перфоратора и представляющий собой ряд пластинчатых зубчатых секторов, поджимаемых к стенке скважины центрально расположенной винтовой пружиной.



Рис. 1. Бесштанговый перфоратор

В 1957 г. В.А. Селезневым, Л.Я. Сазоновой, А.И. Комаровой и в 1964 г. Г.Л. Коваль и П.И. Сидоренко [5] были разработаны автоматические подающие устройства шагающего типа для бесштанговых буровых снарядов, которые содержали опорные элементы тормозов в виде пневматических фонарей, рис. 2.



Рис. 2. Бесштанговый снаряд поворотного действия

В 1968 г. сотрудниками ИГД СО АН СССР Н.С. Лавровым, Ю.М. Волковым и П.Э. Мальбертом были заявлены две конструктивные схемы бесштанговых снарядов вращательного действия для образования скважин в твердом грунте с выносом продуктов разрушения от забоя [5], которые отличались от ранее известных особой компоновкой подающего механизма и бурового инструмента. Одна из этих схем показана на рис. 3.

В 1979 г. в ИГД СО АН СССР Э.П. Варнелло создал опытный образец бурового бесштангового пневмоударного снаряда БПП-1А (рис. 4) для проходки скважин в угле и других горных породах с коэффициентом крепости по М.М. Протодьяконову до 3. Снаряд содержал корпус, внутри которого под действием давления сжатого воздуха ударник совершал возвратно-поступательное движение и наносил удары по породоразрушающему инструменту, а также по передней части корпуса для продвижения снаряда в скважине. В задней части снаряда был выполнен тормоз для предотвращения перемещения корпуса в направлении от забоя. Снаряд БПП-1А с хорошими результатами был испытан на одной из шахт производственного объединения "Южкузбассуголь".



Рис. 3. Бесштанговый снаряд ударно-вращательного действия



Рис. 4. Бесштанговый снаряд ударного действия

Представленный краткий обзор идей и технических решений дает, на наш взгляд, основание говорить о принципиальной возможности создания и доведения до промышленного применения бурового устройства, автономно перемещающегося в породном массиве.

Проблемой, присущей всем механическим способам разрушения горной породы применительно к движению подземной ракеты, является увеличение объема измельченной породной массы. Поэтому необходимы технические решения, предусматривающие уплотнение, либо удаление части разрушенной породы. Известны решения этой проблемы для процесса бурения. Однако, большинство из них не пригодно для транспортировки разрушенной породы на большие расстояния. В связи с этим особый интерес представляет поиск метода физико-химических преобразований вещества геосреды, сопровождающегося уменьшением объема вещества или образованием газа, который может быть удален из скважины простыми способами.

Следующей ключевой проблемой при создании подземных ракет является их энергообеспечение. Вследствие большой энергоемкости рассмотренных выше процессов, необходимо развивать два типа устройств:

1. Автономные устройства.

2. Неавтономные устройства.

Неавтономные устройства могут снабжаться энергоносителем по какомулибо каналу из точки старта. Недостатком таких систем будет являться ограниченный радиус действия. Однако упрощение конструкции при этом играет не последнюю роль, особенно на начальных этапах решения широкого круга задач.

И, наконец, очень важным моментом в выборе принципиальной рабочей схемы устройства является способ управления его движением. При этом управлению подлежит не только направление движения устройства, но, возможно, и способ, которым движение осуществляется. Возможно применение следующих систем обеспечения этой функции:

1. Системы, имеющие канал внешнего управления.

2. Системы, следующие заранее заданной программе.

3. Так называемые «интеллектуальные системы», т.е. способные при необходимости самостоятельно изменять алгоритм работы (можно пояснить примерами).

Тем не менее, выполненный нами обзор идей и технических решений дает основание говорить о принципиальной возможности создания автономно перемещающегося в породном массиве проходчика. Уверенность в этом придают полученные в ИГД СО РАН результаты исследования процесса разрушения массива горных пород, выноса разрушенного материала [4,5] и новые технические решения, позволяющие создать в перспективе высокотехнологичный инновационный продукт – автономно передвигающееся в породном массиве по управляемой траектории проходческое устройство.

АПУ будет состоять из генератора ударных импульсов, передаваемых породоразрушающему инструменту, вращаемому вместе с генератором. Крутящий момент целесообразно обеспечить разработанным в ИГД СО РАН импульсным вращателем, имеющим удельные энергетические показатели, значительно превышающие показатели известных аналогов, и не требующего компенсации реактивных сил. Для обеспечения осевого усилия, перемещающего АПУ в грунте предназначен механизм подачи с упором, обеспечивающим восприятие реактивных сил грунтом. Генератор импульсов, вращатель и податчик объединены в единый агрегат, воздействующий на породоразрушающий инструмент. Грунт по трубопроводу, расположенному в скважине и вращающемуся вместе со всем агрегатом, удаляется на поверхность.

В такой постановке последовательность технологических операций по проходке протяженной скважины будет выглядеть следующим образом:

- проходка пионерной скважины пневмопробойником с системой управления траекторией движения в породном (грунтовом) массиве;

- образование окончательной скважины АПУ, перемещающимся в породном массиве по траектории, заданной пионерной скважиной.

Таким образом, можно констатировать, что при создании автономного проходчика придется решать целый ряд серьезных научных задача. В то же время в Институте горного дела СО РАН имеются фундаментальные научные результаты в области нелинейной геомеханики и машиноведения. Специалистами Института были созданы уникальные самодвижущиеся в грунтовой среде пневмоударные механизмы (пневмопробойники), получившие на международном рынке название «русская ракета».



Рис. 7. Конструктивная схема макетного образца АПУ: 1 – податчик; 2 – кольцевая опорная мембрана; 3 – расширенная скважина; 4 – вращатель; 5 – ударный механизм; 6 – породоразрушающий инструмент; 7 – грунтоприемная полость; 8 – пионерная скважина

Совместно с НПО «Сапфир» получены и опробованы новые технические решения, обеспечивающие определение с высокой точностью положение движущегося в грунте пневмопробойника. Дальнейшее развитие полученных знаний привело к получению пионерных научных результатов в области создания погружных геологоразведочных пневмоударников с двойной буровой колонной и сквозным шламопроводом. По общему признанию специалистов эти пневмоударники явились революционным прорывом в геологоразведочном бурении. Институт горного дела СО РАН совместно с СКБ «Геотехника» (г. Москва») разработали и довели до практического применения комплекс технических средств для разведки россыпных месторождений золота, залегающего в вечномерзлых породах Северо-Востока России, и урановых месторождений.

Все это свидетельствует о потенциальной готовности ученых ИГД СО РАН обосновать и выполнить проект по созданию автономно перемещающейся в верхней части земной коры – своего рода «подземном космосе» - управляемой ракеты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oparin V.N., Smolyanitsky B.N. Promote efficiency of drilling equipments in tunneling and drilling rocks // Journal of Lioning Technical University (National Science). – 2009. – Vol. 28. – № 3. pp. 445–449.

2. Опарин В.Н., Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н. Обоснование принципов построения конструктивной схемы «подземной ракеты». // ФТПРПИ. – 2010. – № 3.

3. А.В. Войнилович, Б.М. Бычков. Устройство для автоматической подачи перфоратора в шпуре или скважине. Авторское свидетельство на изобретение (СССР) № 72531, БИ № 9. – 1948.

4. Малышев В.И., Васильев А.И., Погодаев В.И. Погружной перфоратор для бурения скважин. Авторское свидетельство на изобретение (СССР) № 115474, БИ № 10. – 1958.

5. Варнелло Э.П., Каменский В.В. Схемы и конструкции бесштанговых снарядов для проходки скважин в горных породах. Пневматические ударные машины // Сборник научных трудов ИГД СО АН СССР. Новосибирск: Изд-е ИГД СОРАН. – 1980.

© Б. Н. Смоляницкий, Е. Д. Тимофеев, 2015

О КЛАССИФИКАЦИЯХ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ПРОЧНОСТНЫМ СВОЙСТВАМ

Александр Савельевич Танайно

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Показаны общие закономерности в построении классификаций горных пород по прочностным свойствам. Предлагается метод оценки комплексных характеристик горных пород (сопротивляемость разрушению, коэффициент крепости) с использованием компонент их структуры.

Ключевые слова: коэффициент крепости горных пород, прочность на сжатие, растяжение, контактная прочность, каноническая шкала, показатели разрушаемости горных пород.

CLASSIFICATION OF ROCK MATERIAL BASED ON STRENGTH

Alexander S. Tanaino

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Head of Structural Analysis and Sample Preparation Laboratory, tel. (383)334-88-80, e-mail: tanaino@misd.nsc.ru

The author describes classification of rock materials based on their strength behavior. It is suggested to assess characteristics of rocks (fracture resistance, hardness coefficient) using their structural components.

Key words: rock mass hardness coefficient, compression strength, tension, contact strength, canonical scale, rock collapsibility.

На основании анализа существующих классификаций горных пород по прочностным свойствам установлены сложившиеся особенности их построения. Так, в первых классах всех классификаций, данные о значениях прочности не определены и представляются в виде "< C_2 ", где C_2 -значение прочности во втором классе. Следовательно, авторы классификаций не учитывают возможности применяемых методов испытаний [1]. Неопределённость значения прочности в первом классе приводит и к неопределённости "нуля" шкалы, отсутствующего во всех классификациях.

Установлена особенность существующих классификаций, заключающаяся в приемлемом единообразии распределения значений показателей по классам прочности со следующими соотношениями:

$$Z_{J} = Z_{0} \cdot \exp(k \cdot J) = Z_{0} \cdot (\mu)^{j}; J = [\ln(Z) - \ln(Z_{0})] / \ln(\mu);$$
(1)
$$\mu = Z_{J+1} / Z_{J}; k = 2.0205 \cdot (Z_{j+1} - Z_{j}) / (Z_{j+1} + Z_{j}),$$

где Z_J-значение показателя прочности породы в J-ом классе; Z₀- опорное значение прочности, определяющее «нуль» шкалы; k, µ -параметры классифика-

ции, определяющие характер распределения значений свойств по классам прочности.



Рис. 1. Распределение значений параметра µ в классификациях: 1 – на одноосное сжатие; 2 – растяжение; 3 – по коэффициенту крепости по М.М. Протодьяконову; 4 – контактной прочности; 5 – по агрегатной твёрдости. Примечание: данные для расчётов заимствованы из [2-5]

Из (1) следует, что параметр и определяет характер распределения показателей по классам прочности (Ј). Характерно, что во всех рассмотренных классификациях значения μ не постоянны (рис. 1), хотя размах изменений незначительный. Среднее значение составляет μ 1.436, что достаточно близко к значению параметра, определяющего феноменологическую закономерность кластеризации свойств геовещества [6], согласно которой базовое значение параметра определено равенством $\mu = (2)^{1/m} = 1.414214$ при m=2, где m – порядок канонической шкалы. При этом значении µ получены классификации по пределам

прочности на одноосное сжатие, растяжение, контактной прочности и агрегатной твёрдости (см. табл.). Классификация по коэффициенту крепости (f) получена при $\mu = (2)^{1/3} = 1.26$.

Таблица

	Распределение значений пределов прочности					
Классы пород	в классификации горных пород					
	на сжатие	на	ПО	ПО	ПО	
		растяжение	конт. проч.	коэф. креп.	агрег. твёрд.	
	(от-до), МПа	(от-до), МПа	(от-до), МПа	(от-до), у.е.	(от-до), МПа	
0-1	4-6	0.4-0.6	140-198	1.5-1.9	40-57	
1-2	6-8	0.6-0.8	198-280	1.9-2.4	57-80	
2-3	8-12	1.1-1.6	280-396	2.4-3.0	80-113	
3-4	12-17	1.6-2.3	396-560	3.0-3.8	113-226	
4-5	17-24	2.3-3.2	560-792	3.8-4.8	226-320	
5-6	24-34	3.2-4.5	792-1120	4.8-6.0	320-453	
6-7	34-48	4.5-6.4	1120-1584	6.0-7.6	453-640	
7-8	48-67	6.4-9.1	1584-2240	7.6-9.5	640-905	
8-9	67-95	9.1-12.8	2240-3168	9.5-12.0	905-1280	
9-10	95-134	12.8-18.1	3168-4480	12.0-15.1	1280-2560	
10-11	134-190	18.1-25.6	4480-6336	15.1-19.0	2560-3620	
11-12	190-269	25.6-36.2		19.0-24.0	3620-5120	
12-13	269-380	36.2-51.2		24.0-30.2	5120-7240	

Классификации горных пород по прочности в канонических шкалах

В заключение по представленной выше первой части работы отметим следующее. На протяжении многих лет работы по создания классификаций горных пород по прочностным свойствам сводились с ориентацией на классификацию М.М. Протодьяконова посредством получения формул для пересчёта значений коэффициента крепости с прочностью пород на различные виды испытаний. Но авторы этих формул не учитывают то, что понятие "крепость", отсутствующее в классической механике М.М. Протодьяконов определил как сопротивляемость их разрушению от внешних усилий, полагая, что «...сопротивляемость эта обуславливается комбинацией элементарных сопротивлений растяжению, сжатию, сдвигу..» (цитировано по [3]). Как следует из приведенного, коэффициент крепости предложен как некоторый обобщённый показатель. Надо так же иметь в виду, что классификация М.М. Протодьяконова, которая до сих пор популярна в горном сообществе, создавалась в период 1913-1926 гг. и в основу её создания была положены производительность труда горнорабочих, расход материальных ресурсов технологий тех далёких лет. Поэтому в настоящее время эта классификация не актуальна. Следовательно, необходим метод интегральной оценки разрушаемости пород инвариантный относительно технологическим процессам. Метод такого типа в 80-е годы предложил акад. В.В. Ржевский и разработал классификацию по "трудоёмкости разрушения" горных пород, сопоставив её с классификацией М.М. Протодьяконова, получил их тождественность [7]. При этом показатель "трудоёмкости разрушения" В.В. Ржевский предложил определять по выражению: Пр= $5 \cdot 10^{-2} (\sigma_s + \sigma_p + \tau_c) + 5 \cdot 10^{-5} \lambda$, где σ_s , σ_p , $\tau_c - \tau_c$ соответственно пределы прочности на одноосное сжатие, растяжение, сдвиг, МПа; λ- объёмный вес породы, Н/м³; 5·10⁻²; 5·10⁻⁵ –коэффициенты с размерностью соответственно $(M\Pi a)^{-1}$ и м³/H.

Ниже нами предлагается метод оценки сопротивляемости горных пород разрушению посредством количественного представления факторов обуславливающих их прочностные свойства.

Из всей совокупности физических свойств горных пород на сопротивляемость их разрушению наибольшее влияние оказывают зернистость, пористость, состав породообразующих минералов и их твёрдость, прочность структурных связей между зёрнами, влажность. Исходим из того, что если все прочностные свойства классифицируются по одной и той же закономерности, то факторы, их обуславливающие, находятся в такой же связи. На этом основании запишем выражения для безразмерного представления физических свойств по уровням их кластеризации в канонической шкале:

$$J_x = C \cdot \ln(x/x_0) + 1 \tag{2}$$

$$\mathbf{J}_{\mathbf{y}} = 1 - \mathbf{C} \cdot \ln(\mathbf{x}/\mathbf{x}_0) \tag{3}$$

где J_x , J_y – безразмерные показатели, оценивающие значимость уровня х-го и у-го свойства в сопротивляемости горной породы разрушению; х, у, х₀, у₀ – соответственно конкретные средние значения свойства х и у в образце горной породы и базовые их значения свойства; C=2.8854–здесь и ниже. Принципиальное отличие (2) и (3) обусловлено необходимостью отразить различное влияние свойств. Так, например, известно, что с ростом сил связи между частицами, слагающими породу, сопротивляемость её разрушению возрастает. Для отображения этой закономерности используется (2) в предположении, что с увеличением D_x влияние S_x возрастает. При этом в качестве опорного D_{0x} принимается минимальное значение анализируемого свойства. Если увеличение значения свойства ведет к снижению сопротивляемости породы разрушению (например, увеличение зернистости), то используется (3). Таковы общие положения предлагаемого подхода к определению интегрального показателя сопротивляемости горных пород разрушению по физическим их свойствам.

Зернистость горных пород. С увеличением размеров зерна прочность пород, как правило, снижается. Следовательно, для отображения этого эффекта показатель зернистости определим по (4). На этом основании, для оценки влияния зернистости на сопротивляемость горных пород разрушению, (3) запишем в следующем виде:

$$J_z=1-C \cdot \ln(d/d_0);$$
при $d_0=14$, получим: $J_z=-C \cdot \ln(d)+8.615$ (4)

где d, d0, – соответственно, размер (мм) естественной отдельности (зерна) и базовое его значение.

Пористость. С увеличением общей пористости, а также других структурных дефектов в моно- и полиминеральных породах, их плотность, прочность и модуль упругости проявляют тенденцию к снижению. Поэтому, для учёта влияния пористости в обобщённом показателе сопротивляемости горных пород разрушению, используем зависимость по типу (3), представив её в виде:

$$J_p=1-C \cdot \ln(p/p_0)$$
 при $p_0=30$ получим: $J_p=-C \cdot \ln(p)+10.814$ (5)

где J_p – безразмерный показатель, оценивающий степень пористости горной породы; P_p, P₀ – соответственно, пористость и опорное её значение.

Пределы изменения пористости зависят от генотипов горных пород. В интрузивных породах она находится на уровне – 0.1 - 3% и, редко, выше [8]. Пористость осадочных обломочных пород характеризуется широким интервалом значений – до 60% в период образования из осадков и от 2 до 40% в последующей геологической истории. Пористость осадочных обломочных (песчаных и глинистых) пород находится в линейной зависимости от их плотности [8]. Следовательно, учёт общей пористости равносилен совокупному учёту соотношений между плотностью минеральной части и объёмной массой породы.

Твердость горных пород. Из известных методов оценки твердости горных пород (Моос, Виккерс, Роквелл, Шор, и др.) используем твердость по Моосу. Основанием для этого является то, что твердость отдельных минералов, слагающих горную породу, во многом определяет ее твердость как агрегата, а в справочной литературе приводятся данные о твердости минералов, как правило, по Моосу (R_{Mi}).

Полагаем, что по результатам минералогического анализа, известно содержание породообразующих минералов (M_i, %) и их твёрдость. С повышением средневзвешенной твёрдости породы, как агрегата состоящего из k минералов, её сопротивление разрушению возрастает. Следовательно, для учета этого свойства используем выражение по типу (2), записав его в виде:

$$Jr = C \cdot \ln(R_p / r) + 1;$$
 при r =1 получим C · ln(R_p)+1 (6)

Прочность связей между зёрнами породы. Из существующих и широко доступных инструментальных методов испытаний горных пород, оценку прочности связей между зёрнами с некоторым приближением можно получить посредством испытания на растяжение методом бразильской пробы (σ_r , МПа). Используем показатель σ_r в качестве условной оценки прочности связей между зёрнами породы, полагая при этом, что сопротивляемость породы разрушению увеличивается с возрастанием σ_r :

$$J_g = C \cdot \ln(\sigma_r / \sigma_0) + 1$$
, при $\sigma_0 = 0.5$ получим $J_g = C \cdot \ln(\sigma_r) + 3$ (7)

Влажность горных пород. В общем случае понятие влажности связано с массовой долей содержания свободной и физически связной воды в горной породе. Из всего множества показателей определяющих содержание воды, в данной работе используем показатель «естественной влажности» пород (W). Дисперсные породы не рассматриваем. Естественная влажность (W_p) для полускальных и скальных горных пород, согласно [8], находится в пределах 0.5÷25%. Поскольку с повышением влажности горных пород прочность их снижается, то для отражения этого положения, воспользуемся зависимостью вида (3):

$$J_w=1-C \cdot \ln(w/w_0)$$
, при $w_0=25$ получим $J_w=-C \cdot \ln(w)+10.288$ (8)

Суммируя (4)–(8) получим: $F=C \cdot [\ln(Rp) + \ln(\sigma_r) - \ln(d) - \ln(p) - \ln(w)] + 33.72$ (9)

Вычисляя по минимальным и максимальным значениям параметров, составляющих (9), получим, что показатель сопротивляемости горных пород разрушению находится в пределах от 5 до 80 безразмерных единиц. Приняв нуль в канонической шкале равным 5 и её порядок m=3 (т.е. µ=1.26, см. (1) и объяснение) получим классификацию горных пород по сопротивляемости разрушению. Сопоставление её с исходной (по М.М. Протодьяконову) классификацией по коэффициенту крепости, представив их графически (рис. 3).

Исходя из однотипного характера зависимостей, приходим к заключению, что предложенный показатель сопротивляемости горных пород разрушению соизмерим с коэффициентом крепости. При этом коэффициент сопротивляемости горных пород разрушению вычисляется по компонентам структуры породы и не зависит от технологических процессов, что весьма существенно.

Дальнейшее развитие предложенного метода оценки сопротивляемости горных пород разрушению, автор видит в использовании основных его положений применительно к определению сопротивляемости разрушения горного массива, что весьма актуально как в части решения задач устойчивости, так и в технологических аспектах.



Рис. 2. Сопоставление классификаций сопротивляемости горных пород разрушению (сплошные линии) классификацией по коэффициенту крепости (пунктирные линии)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 21153.3-85. Горные породы. Методы определения прочности при одноосном растяжении – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 27.11.1985.

2. Справочник. Открытые горные работы. / К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виницкий, Н.Н. Мельников и др. – М.: Горное бюро. – 1994.

3. Барон Л.И. Коэффициенты крепости горных пород. – М.: Наука, 1972.

4. Барон Л.И., Глатман Л.Б. Контактная прочность горных пород. –М.: Недра – 1966.

5. Шрейнер Л.А., Петрова О.П., Якушев В.П., Портнова А.Т. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. – М.: Гостоптехиздат. – 1958.

6. Опарин В.Н., Танайно А.С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. – Новосибирск: Наука СО РАН. – 2011.

7. Горная энциклопедия / гл. ред. Е.А. Козловский и др. – М.: Сов. Энцик. – Т. 3.

8. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика. – М.: Недра. – 1976.

© А. С. Танайно, 2015

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ЗАПОЛЯРНОГО ФИЛИАЛА ОАО «ГМК "НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ"»

Александр Петрович Тапсиев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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)217-01-42, e-mail: labprrm@list.ru

В статье рассмотрено состояние и перспективы развития в 2015 году минеральносырьевой базы 3Ф ОАО «ГМК "Норильский никель"». Приведена структура добычи по сортам руд. Оценены главные направления воспроизводства запасов в ближайшей перспективе.

Ключевые слова: твердые полезные ископаемые, минерально-сырьевая база, воспроизводство запасов, структура переработки руд.

MINERAL AND RAW MATERIALS SUPPLY OF THE TRANSPOLAR DIVISION NORILSK NICKEL: STATE-OF-THE-ART AND PROSPECTS

Alexander 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, Principal Researcher, Underground Ore Mining Laboratory, tel. (383)217-01-42, e-mail: labprrm@list.ru

The paper reviews the state-of-the-art and prospects for the mineral and raw materials supply base of Transpolar Division of Norilsk Nickel in 2015. Basic lines of activities in the area of reproduction of the reserves in the nearest future are assessed.

Key words: hard minerals, mineral and raw materials base, reproduction of reserves, ore processing structure.

Заполярный филиал (3Ф) – производственное подразделение открытого акционерного общества «Горно-металлургическая компания «Норильский никель», которое является крупнейшим в мире производителем никеля и палладия и ведущим производителем платины, кобальта, меди и родия в мире [1]. Медноникелевые сульфидные руды 3Ф добываются на рудниках «Октябрьский», «Таймырский», «Комсомольский» в пределах Талнахского рудного узла и на руднике «Заполярный» в пределах Норильского рудного узла (рис. 1).



Рис. 1. Основные активы ЗФ ОАО «ГМК "Норильский никель"»: *1* — населенные пункты; 2 — рудники. ОФ — обогатительная фабрика; МЦ — металлургический цех

Отечественная минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых достаточно сбалансирована и обладает почти всеми необходимыми видами сырья для устойчивого развития промышленности. В то же время объемы геологоразведочных работ в России по воспроизводству запасов никеля неудовлетворительны — показатель воспроизводства запасов составляет 22,7% [2]. По состоянию на 31.12.2013 г доказанные и вероятные запасы руды Талнахского и Норильского рудных узлов составляют более 715 млн тонн. Компания обеспечивала регулярное поддержание объема запасов руды за счет геологоразведочных работ. В 2015 году планируется в 1,5 раза увеличить объемы бурения разведочных скважин для восполнения запасов на флангах Талнахского и Октябрьского месторождений и на Масловском месторождении [1]. Основная часть запасов всех месторождений представлена вкрапленными рудами. Наибольшую промышленную ценность представляют залежи сплошных сульфидных руд. Их экзоконтакты часто представлены медистыми рудами, названными так из-за преобладания в их составе меди над никелем. Вкрапленные и медистые руды требуют более сложного процесса обогащения.

На круговой диаграмме (рис. 2), представлено соотношение годовых объемов добычи сплошных, медистых и вкрапленных руд на рудниках 3Ф ОАО «ГМК «Норильский никель» [1].



Рис. 2. Структура добычи руд по сортам на рудниках 3Ф: 1 – вкрапленные руды; 2 – сплошные руды; 3 – медистые руды

Анализ участков, выделенных для проведения геологоразведочных работ в 2015 году показывает, что прирост запасов и перевод вероятных запасов руды в промышленные категории по всем трем сортам с большой вероятностью обеспечит восполнение отработанных объемов руды.

Обогатительный передел 3Ф включает три металлургических завода (Медный завод, Никелевый завод, Надеждинский металлургический завод) и две обогатительные фабрики: Норильскую и Талнахскую (рис. 1).

Талнахская обогатительная фабрика перерабатывает богатые руды Талнахского и Октябрьского месторождений с получением никелевого, медного и пирротинового концентратов [3]. Норильская обогатительная фабрика перерабатывает весь объем вкрапленных руд, «медистые» руды Талнахского и Октябрьского месторождений, а также лежалый пирротиновый концентрат с получением никелевого и медного концентратов.

Надеждинский металлургический завод перерабатывает весь объем никелевого и пирротинового концентратов Талнахской обогатительной фабрики, часть никелевого концентрата Норильской обогатительной фабрики (около 15%) и весь объем медного концентрата участка разделения файнштейна обжигового цеха Никелевого завода с получением файнштейна, медных анодов и элементарной серы [3].

Никелевый завод перерабатывает основную часть объема никелевого концентрата Норильской обогатительной фабрики (около 85 %), весь объем обогащенного лежалого пирротинового концентрата, часть файнштейна Надеждинского металлургического завода с получением товарного никеля и кобальта [3].

Медный завод перерабатывает весь объем медных концентратов Норильской и Талнахской обогатительных фабрик и медные аноды Надеждинского металлургического завода с получением товарной меди, элементарной серы и серной кислоты [3]. Металлургический цех производства концентратов драгоценных металлов (МЦ на рис. 1), являющийся подразделением Медного завода, перерабатывает шламы цеха электролиза меди и цеха электролиза никеля с последуюим получением концентратов драгоценных металлов, металлического серебра, селена и теллура [3].

Аффинаж драгоценных металлов, производимых 3Ф, осуществляется по соглашениям о переработке на Красноярском заводе цветных металлов.

Благодаря правильной политике при воспроизводстве запасов товарных металлов, производимых 3Ф ОАО «ГМК «Норильский никель», в 2014 году удалось сохранить на уровне 2013 г производство никеля и меди, повысить на 3% производство палладия [1]. Снижение производства платины на 1% следует в большей мере отнести к недоработкам Красноярского завода цветных металлов (рис. 3).



Рис. 3. Изменение производства основных металлов (%) по 3Ф ОАО «ГМК «Норильский никель» в 2014 году относительно 2013 г.

Анализ результатов производственной деятельности ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» показывает, что соблюдение структуры добычи по сортам руд и своевременное воспроизводство запасов геологоразведочными работами позволит сохранить уровень производства металлов в ближайшей перспективе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Официальный сайт WWW nornik.ru.

2. Опарин В.Н., Фрейдин А.М., Тапсиев А.П., Филиппов П.А. Состояние и проблемы минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых России // ФТПРПИ. – 2013. – № 4, с. 173-181.

3. Опарин В.Н., Тапсиев А.П., Богданов М.Н., Бадтиев Б.П., Куликов Ф.М., Усков В.А. Современное состояние, проблемы и стратегия развития горного производства на рудниках Норильска.– Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2008, 372 с.

© А. П. Тапсиев, В. А. Усков, 2015

ПОГРУЖНОЙ ПНЕВМОУДАРНИК ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НА ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Владимир Владимирович Тимонин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, заведующий лабораторией бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)217-27-54, e-mail: timonin2005@ngs.ru, timonin@misd.nsc.ru

Андрей Сергеевич Кондратенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)220-10-11, e-mail:kondratenko@misd.nsc.ru

Рассмотрена новая схема воздухораспределения для погружных пневматических ударных машин для бурения скважин на открытых горных работах на буровых станках высокого давления сжатого воздуха. Представлены результаты экспериментальных исследований машины.

Ключевые слова: погружной пневмоударник, высокое давление сжатого воздуха, скважина, бурение, энергия удара.

DOWNHOLE HIGH PRESSURE AIR HAMMERS FOR OPEN PIT MINING

Vladimir V. Timonin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Head of Drilling and Pulse-Forming Machines Laboratory, tel. (383)217-27-54, e-mail: timonin2005@ngs.ru, timonin@misd.nsc.ru

Andrey S. Kondratenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Eng, Researcher, HeadofDrilling and Pulse-Forming Machines Laboratory, tel. (383)220-10-11, e-mail: kondratenko@misd.nsc.ru

Under discussion is a new layout of air distribution system for air percussion machines meant for hole drilling in open pit mining using high compressed air pressure drill rigs. The data of experimental research of the machines are presented.

Key words: down hole air hammer, high compressed air pressure, hole, drilling, blow energy.

История развития самоходных буровых станков для бурения скважин на открытых горных работах начинается с 50-х годов прошлого столетия. В 1968 году Институтом горного дела СО АН СССР совместно с Магнитогорским заводом горного оборудования и институтом НИПИГОРМАШ разработаны буровые станки «Урал-61» и «Урал-64», рис. 1 [1]. Станки предназначались для бурения вертикальных и наклонных скважин диаметром 155 мм, в породах крепостью 10-20 ед. по шкале проф. М.М. Протодьяконова на открытых горных работах.



Рис. 1. Самоходная буровая установка «Урал-64» ударно-вращательного действия с погружным пневматическим молотком и автоматическим механизмом вращения и подачи става

В основу конструкции положены принципы ударно-вращательного бурения пневматическим молотком, погруженным в скважину, и механизмом непрерывной автоматической подачи, позволяющим бурить скважину на полную глубину без разборки става штанг. Машина представляла собой самоходную установку на гусеничном ходу, на которой закреплена стрела с механизмом вращения и автоматической подачи, а также став буровых штанг с молотком и коронкой. На платформе была смонтирована кабина бурильщика и вспомогательное оборудование.

Это был несомненно прорыв в области буровой техники. После, в силу ряда экономических и политических событий рынок самоходной буровой техники наполнился импортными экземплярами. Наиболее известными и распространенными на отечественном рынке является буровое оборудование шведской фирмы AtlasCopco, рис. 2.



Рис. 2. Самоходная буровая установка AtlasCopco ROC L7

С недавних пор отечественная промышленность делает попытки догнать зарубежных производителей в этой области. Большим шагом к этому явилось
создание бурового станка «Буран-1», рис. 3 заводом тяжелого машиностроения «Амурский металлист», г. Благовещенск.

Буровой станок ударно-вращательного бурения «Буран-1» по своей производительности соответствует лучшим мировым аналогам.Однако высокая скорость бурения обеспечивается применением импортных буровых коронок и пневмоударников DHD.



Рис. 3. Самоходная буровая установка «Буран-1»

В соответствии с этим в ИГД СО РАН проведен поиск технических решений, позволяющих создать конкурентоспособные, отвечающие требованиям современного производства пневмоударники и разработана принципиальная схема погружного пневмоударника[2, 3]. Изготовлен экспериментальный образец погружного пневмоударника, работающего на высоком (2,5 МПа) давлении сжатого воздуха.

На рис. 4 приведена конструкция этого пневмоударника, способного в будущем заменить на российских горных предприятиях зарубежные машины.



Рис. 4. Конструкция пневмоударника П110ВД: 1 – переходник, 2 – корпус, 3 – букса, 4 – буровое долото, 5 – ударник, 6 – трубка внутренняя, 7 – трубка наружная, 8 – гильза, 9 – клапан обратный

В лаборатории бурения и технологических импульсных машин ИГД СО РАН на экспериментальном стенде были проведены испытания пневмоударника, установившие его работоспособность, и зарегистрированы диаграммы давлений (рис. 5) в его рабочих камерах при рабочем давлении энергоносителя -0,7 МПа. Полученные диаграммы позволили оценить правильность основных подходов в разработке пневмоударника. Применяя методику, основанную на использовании теоремы Б.В. Суднишникова, построены силовая (рис. 6) характеристика, рассчитаны основные энергетические и кинематические параметры, построены графики (рис. 7) скорости и перемещения ударника по времени рабочего цикла [4].



Рис. 5. Диаграммы давлений в рабочих камерах пневмоударника П110ВД

В таблице представлены энергетические параметры пневмоударника П110ВД при различном давлении энергоносителя.

Таблица

Энергетические	Давление сжатого воздуха, МПа							
параметры	0,7	1,0*	1,5*	2,0*	2,5*			
Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	4,0	5,3	8,1	10,8	13,5			
Энергия единичного удара, Дж	112	160	240	320	400			
Частота ударов, уд/мин	1200	1434	1757	2030	2270			
Мощность, кВт	2,2	3,8	6,9	10,6	14,8			

Энергетические параметры пневмоударника П110ВД

* – рассчитанные значения



Рис. 6. Диаграмма результирующей силы, действующей на ударник за время цикла



Рис. 7. Графики скорости и перемещения ударника за время цикла

Таким образом, полученные результаты подтверждают создание нового энергонасыщенногопогружного пневмоударника для ударно-вращательного бурения скважин в массиве прочных горных пород. Выпуск этого оборудования на предприятиях РФ и широкое применение в практике буровых работ усилит конкурентные позиции отечественной техники и создаст перспективы для развития прорывных технологий в горнодобывающей отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новые технологические процессы, машины, устройства и приборы для горной, металлургической и строительной промышленности. Проспект научно-исследовательских работ, предложенных для использования в народном хозяйстве // Новосибирск. – 1968.

2. Пат. 2360092 Российская федерация, МПК Е21В 4/14 (2006.01). Погружной пневмоударник [Текст]/ Липин А.А., Белоусов А.В., Тимонин В.В.; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН. – Опубл. 27.06.2009. – Бюл. № 18.

3. Пат. 85185 Российская федерация, МПК Е21В 4/14 (2006.1). Погружной пневмоударник. / Липин А.А., Белоусов А.В., Тимонин В.В. – Опубл. 27.07.2009. – Бюл. № 21.

4. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Червов В.В. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2013.

© В. В. Тимонин, А. С. Кондратенко, 2015

ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОМАТЕРИАЛОВ СО СТРУКТУРОЙ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ –20 ДО +120 °С ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ^{*}

Ольга Михайловна Усольцева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, руководитель ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Павел Александрович Цой

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса 20, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

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

Борис Борисович Сиволап

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

Получены новые закономерности и корреляционные зависимости изменения деформационно-прочностных характеристик образцов из искусственных гетерогенных геоматериалов с заданными параметрами двухкомпонентной структуры 2-х видов: минеральные частицы + связующее, с различным соотношением пределов прочности. Определено влияние вида нагружения при следующих значениях температур: –20, 0, 20, 40, 60, 80, 90, 95, 100, 105, 120 °С.

Ключевые слова: горная порода, лабораторный эксперимент, деформационно-прочностные свойства, растяжение, одноосное, объемное сжатие, температура.

CHANGE OF DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF STRUCTURED GEOMATERIALS IN THE TEMPERATURE RANGE FROM –20 TO +120 °C UNDER DIFFERENT-TYPE LOADING

Olga M. Usoltseva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Phys-Math, Executive Director of Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical and Geodynamic Measurements SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx prospect, Ph. D. Phys-Math, Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

^{*} Работа выполнена на оборудовании ЦКП ГГГИ СО РАН.

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

Boris B. Sivolap

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Chief engineer, tel. (383)330-96-41, e-mail: bor.nsk.ru@mail.ru

The authors have derived new laws and correlation dependences for change in the deformation and strength characteristics of specimens made of artificial heterogeneous geomaterials with preset parameters of two-component structure of 2 types (mineral particles + binder with varied ratio of ultimate strengths) and assessed influence of loading type at the following temperatures: -20, 0, 20, 40, 60, 80, 90, 95, 100, 105, 120 °C.

Key words: rock, laboratory experiment, deformation and strength characteristics, tension.

Экспериментальные данные по деформационным и прочностным свойствам горных пород, а также оценка их изменения в зависимости от напряженно-деформированного состояния и температурных условий являются крайне необходимыми в прогнозе устойчивости породных массивов при ведении горных работ, оценке несущей способности грунтов и горных пород при проектировании и возведении зданий и сооружений. Имеется достаточное количество работ, в которых изучалось влияние на деформационно–прочностные характеристики горной породы температуры [1–5], скорости нагружения [6], микроструктуры [7–11]. Несмотря на обширное количество проведенных экспериментальных работ в данной области на различных видах горных пород, проблема экспериментального исследования закономерностей изменения деформационно-прочностных свойств геоматериалов является по–прежнему актуальной.

В данной работе предложен иной подход, позволяющий на искусственном модельном материале, имитирующем горную породу, с заданными параметрами структуры (связующее с добавлением включений с различными значениями пределов прочности и процентным составом). Искусственные геоматериалы такого типа имитируют слабо сцементированные зернистые горные породы, которые встречаются в осадочных геологических формациях и, зачастую, являются причиной оседания поверхности, нестабильности при бурении скважин, осыпания песка в нефте- и газоносных залежах. Из-за невозможности собрать и охарактеризовать горные породы такого типа возникает сложность получения достаточно полной информации. Альтернативный подход заключается в изготовлении искусственных материалов, в которых подходящие структурные параметры (соотношение пределов прочности связующего и включений, процентный состав) могут методично и независимо друг от друга варьироваться при лабораторных испытаниях.

Основная задача данной работы состояла в том, чтобы определить закономерности перехода образцов искусственных геоматериалов с заданной структурой нескольких типов в предельное состояние при широкой вариации температурных условий и трех видах нагружения – растяжении, одноосном сжатии, объемном сжатии.

Испытания механических свойств испытательных образцов проводились на серво гидравлическом прессе INSTRON 8802 при скорости нагружения 0, 1 мм/мин. В процессе экспериментов непрерывное измерялись и записывались в компьютерный файл: осевая нагрузка, продольная и поперечная деформация;при испытаниях на объемное сжатие – боковое давление, подаваемого на образец, помещенный в компрессионную камеру. Определение деформационных свойств пород производилось согласно требованиям [12–16].

Были изготовлены образцы из следующего состава: І. Связующее (матрица); 2) связующее с добавлением включений из керамзита в количестве 25%, 50%, 75 от общего веса связующего (искусственный геоматериал со структурой типа 3; II. связующее с добавлением включений из метаалевролита в количестве 25%, 50%, 75% от общего веса связующего (структура типа 4); IV. Метаалевролит. Для каждого типа образцов выполнены испытания при трех видах нагружения: растяжение, одноосное сжатие, объемное сжатие с боковым давлением 3 МПа при следующих температурах: –20, 0, 20, 40, 60, 80, 90, 95, 100, 105, 120°С. Для всех серий испытаний определены пределы прочности, сцепление, угол внутреннего трения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона.

На рис. приведены зависимости нормированных пределов прочности σ/σ_0 и безразмерной величины сцепления с/с₀ (отнесенных к пределу прочности σ_0 и сцеплению с₀ соответственно при температуре 20°С).



Рис. Зависимости безразмерных пределов прочности при при растяжении (а), одноосном сжатии (б), объемном сжатии (в) и сцепления (г) от температуры для образцов следующего структурного состава:

1– матрица, 2 – 25% метаалевролита, 3 – 50% метаалевролита, 4 – 75% метаалевролита, 5 – 25% керамзита, 6 – 50% керамзита, 7 – 75% керамзита, 8 – метаалевролит

Анализ экспериментальных данных выявил следующие закономерности:

1. Наиболее существенное влияние температура оказывает на значение предела прочности при растяжении, наименее – при объемном сжатии.

2. Длягеоматериала, структура которого представляет собой более слабые включения относительно матрицы, влияние температуры усиливается с увеличением количества включений. Предел прочности при растяжении и одноосном сжатии для геоматериала, содержащего 25% включений уменьшается на 40%, для 50% включений – на 60%, и для случая 75% включений – на 80–90%. При объемном сжатии предел прочности для геоматериала, содержащего 25% включений – на 30%, и для случая 75% включений – на 30%, и для случая 75% включений – на 30%, и для случая 75% включений – на 30%.

3.Для геоматериала, структура которого представляет собой более прочные включения относительно матрицы, количество включений незначительно влияет на величину предела прочности: при растяжении и одноосном сжатии он уменьшается приблизительно на 30% (для геоматериала, содержащего 25%, 50% и 75% включений), при объемном сжатии – на 20%.

4. В интервале температур испытаний от 95 до 105°С происходит значительно более резкое уменьшение значений пределов прочности образцов всех типов искусственных геоматериалов по сравнению с предыдущим (от 20 до 95°С) и последующим (от 105 до 120°С) температурными интервалами.

5. Получены новые эмпирические зависимости пределов прочности геоматериалов с различным количеством включений от температуры в интервале температур 20°C до 120°C при испытаниях на одноосное сжатие.

Для интервала температур от -20°С до 85-90°С

$$\sigma^{S} = (1 - m)\sigma_{0}^{S} \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{-1,32m - 0,6}, \qquad (1)$$

где – σ^{S} предел прочности образца изготовленного из матрицы при испытании на одноосное сжатие при температуре $T_0 = 293$ K, T – температура испытания, m – относительное количество керамзитовых включений (m=0; 0,25; 0,5; 0,75).

Для интервала температур от 85-90°С до 120°С:

$$\sigma^{S} = (2m+1)\sigma_{0}^{S} \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{-15m-0.8},$$
(2)

для образцов геоматериала с включениями метаалевролита – в интервале температур от –20°С до 85–90°С и от 85–90°С до 120°С – (3) соответственно:

$$\sigma^{S} = (m+1)\sigma_{0}^{S} \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{0,6m-0,85}, \ \sigma^{S} = (1,7m+1,4)\sigma_{0}^{S} \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{-1,8m-2}$$
(3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tian H., Ziegler M., Kempka T. Physical and mechanical behavior of clay stone exposed to temperatures up to 1000° 1C. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.-2014. - 70. - p. 144-153.

2. Arzúa J., Alejano L.R., Walton G. Strength and dilation of jointed granite specimens in servo–controlled triaxial tests. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 69 (2014), p. 93–104.

3. Haeri H., Shahriar K., Fatehimarji M., MoarefvandP. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre–cracked rock–like disks1C // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2014. – 67. – p. 20–28.

4. Li–yun L., Zhi–qiang X., Ming–xiu L., Yi.L., Chen F., Tie–Wu T. An experimental study of I–II–III mixed mode crack fracture of rock under different temperature. 13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China.

5. Meier T., Backers T., Stephansson O. The influence of temperature on Mode II fracture toughness using the Punch–Through Shear with Confining Pressure experiment. Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009.p.1-8.

6. Liu S., Xu J.. Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2013. – 62. – p. 51–58.

7. Meier T., Backers T., Stephansson O. The influence of temperature on Mode II fracture toughness using the Punch–Through Shear with Confining Pressure experiment // ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009 (Ed: M.Diederichs and G. Grasselli).

8. Hansen N., Goldsby D., Kohlstedt D. The importance of grain–boundary sliding during deformation of geological materials // Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. – International Conference. – Leuven. – 2013. – p. 50.

9. Hunter N., Hasalová P., Weinberg R. Strain partitioning in crustal shear zones: the effect of interconnected micaceous layers on quartz deformation // Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. – International Conference. – Leuven. – 2013.

10. Kohli A., Zoback M. Frictional properties of shale reservoir rocks // Journal of geophysical research: solid earth. – 2013. – Vol. 118, pp. 1–17.

11. Kazerani T. Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 64 (2013), pp. 44–55.

12. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

13. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

14. ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.

15. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Методы определения предела прочности при объёмном сжатии.

16. ГОСТ 21153.7–75 Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.

© О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, Б. Б. Сиволап, 2015

ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННЫХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ОТ СТРУКТУРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ. МЕХАНИЗМ ЭВОЛЮЦИИ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ^{*}

Ольга Михайловна Усольцева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, руководитель ЦКП ГГГИ СО РАН, тел. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Павел Александрович Цой

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Владимир Николаевич Семенов

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

Установлены закономерности изменения деформационно-прочностных характеристик от вида нагружения и структуры материала: концентрации включений и соотношения пределов прочности включений и связующего. Показано влияние вида нагружения и структуры геоматериала на развитие зоны разрушения.

Ключевые слова: горная порода, лабораторный эксперимент, деформационно-прочностные свойства, структура, спекл-метод, микродеформации.

DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS VERSUS STRUCTURE OF HETEROGENEOUS MATERIALS UNDER VARIOUS-TYPE LOADING. MECHANISM OF FAILURE ZONE EVOLUTION

Olga M. Usoltseva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D. Phys-Math, Executive Director of Shared Use Center for Geomechanical, Geophysical and Geodynamic Measurements SB RAS, tel. (383)330-96-41, e-mail: usoltseva57@mail.ru

Pavel A. Tsoi

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx prospect, Ph. D. Phys-Math, Researcher, tel. (383)330-96-41, e-mail: paveltsoy@mail.ru

Vladimir N. Semenov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Principal Specialist, tel. (383)330-96-41, e-mail: centre@misd.nsc.ru

^{*} Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 15-05-07566) на оборудовании ЦКП ГГГИ СО РАН.

The authors have found the mechanisms of change in the deformation and strength characteristics of a material versus its loading type and structure: concentration of particles and ratio of ultimate strength of particles and binder. The influence of loading type and structure on evolution of failure zone in geomaterials is illustrated.

Key words: rock, laboratory experiment, deformation and strength characteristics, structure, speckle-method, microdeformation.

В данном исследовании изучаются образцы из искусственного геоматериала, содержащего круглые включения с гладкой поверхностью, вследствие чего сцепление с материалом связующего по границам включений достаточно было достаточно слабым. Рассмотрены два случая: материал 1 – предел прочности связующего материала при осевом сжатии составляет 55,4 МПа, что выше предела прочности включений; материал 2 - предел прочности связующего материала при осевом сжатии составляет 5,9 МПа, что ниже предела прочности включений. В каждый материал включения добавлялись в количестве: 3,1; 6,2; 15,6; 31,2% объема образца, что составляло 50, 100, 250, 500 включений шарообразной формы соответственно. Выполнены испытания образцов по определению деформационно-прочностных характеристик при растяжении, одноосном и объемном сжатии, построены паспорта прочности материалов [1–4]. Средние деформационно–прочностные характеристики и зависимости "напряжение - деформация" партии образцов из материалов 1 и 2 приводятся на рис. 1 и в табл. 1, 2.

Проведенное исследование позволяет заключить следующее:

 Искусственные включения ослабляют прочность материала, независимо от соотношения предела прочности связующего и минеральных частиц;

 При объемном сжатии добавление жестких включений в мягкое связующее приводит к более значительному повышению прочностных свойств;

Значения коэффициента Пуассона и сцепления уменьшаются с увеличением объема включений для двух типов смесей; модуль Юнга и угол внутреннего трения для материала 1 возрастают с количеством включений, для материала 2 – уменьшаются;

– Для материала 2 с увеличением количества включений значительно возрастает участок остаточной прочности, для материала 1 – этот участок уменьшается.

Для исследования механизма зарождения и развития макродефекта в образце, процесс нагружения останавливали при различных уровнях напряжений от 0,5 до пиковой нагрузки, и проводилось исследование поверхности образца под микроскопом.

Анализ микродефектов на поверхности образцов показал, что микротрещины зарождаются на границах включений (рис. 2). Структура материала и характер приложения внешних нагрузок также существенно влияют на механизм образования и развития микротрещин отрыва и сдвига, взаимодействие которых приводит в конечном итоге к формированию макродефекта – макротрещины скола. Механизм образования макротрещины скола зависит как от соотношения предела прочности включений и связующего, так и от характера приложения нагрузок.



Рис. 1. Диаграммы деформирования "напряжение - деформация" (а – материал 1, б – материал 2) при одноосном сжатии в зависимости от концентрации включений: 1 - 0%; 2 - 3,1%; 3 - 6,2%; 4 - 15,6%; 5 – 31,2%

Таблица 1

Деформационно-прочностные характеристики материала из материала 1 с включениями

		Коэф Модуль фици Юнга, ент МПа Пуасо на	Коэф-	Предел прочности, МПа						VEOT
№ Количество п.п. включений	фици- ент Пуассо- на		Сжатие	Растя- жение	Схема Кармана			Сцеп-	BHVTD.	
					4 МПа	8 МПа	10 МПа	ление, МПа	трения (град)	
1	0	14890	0,231	55,4	8,5	62,7	70,8	74,1	11,04	47,6
2	3,1%	14600	0,22	48,1	7,8	51,3	56,7	60,9	10,07	47,6
3	6,2%	12750	0,199	38,5	6,6	46,4	49,9	54,8	8,29	46,5
4	15,6%	10870	0,176	30,8	5,5	35.8	40,8	43,8	6,67	45
5	31,2%	8230	0,163	22,4	4,5	27,3	30,2	33,8	5,32	43,3

Таблица 2

Деформационно-прочностные характеристики материала из материала 2 с включениями

№ Количество п.п.	Модуль Юнга, МПа	Коэф- фици- ент Пуас- сона	Предел прочности, МПа						νгол	
			Сжа- тие	Рас- тяже- ние	Схема Кармана			Сцеп-	BHVTD.	
					4 МПа	8 МПа	10 МПа	ление, МПа	трения (град)	
1	0	991,3	0,311	5,9	2,6	12,8	18,5	24,3	2,03	23,1
2	(3,1%	1103	0,281	5,1	2,1	11,3	15,8	19,4	1,64	23,9
3	6,2%	1203	0,274	4,5	1,8	10,5	14,1	-	1,42	25,0
4	15,6%	1287	0,234	3,8	1,5	9,9	12,4	-	1,2	25,6
5	31,2%	1311	0,187	2,4	1,3	8,3	11,8	-	0,71	25,9



Рис. 2. Фотографии рабочей поверхности образцов на разных стадиях нагружения от 0,5 до пиковой нагрузки

Для материала со структурой типа 1 (жесткая матрица + мягкие включения) разрушается как матрица, так и включения. Трещина скола при сдвиге без бокового поджатия располагается примерно параллельно действию осевой силы, количество микротрещин сдвига, расположенных под углами 30–70° к направлению действия нагружающей силы незначительно (рис. 3 а, б). При сдвиге с боковым поджатием трещина скола имеет сложную ступенчатую поверхность и образует угол 50–70° с направлением осевой силы, как при одноосном, так и при двухосном нагружении (рис. 3 в, г).

Для материала со структурой типа 2 (мягкая матрица + жесткие включения) разрушается только матрица, включения остаются неповрежденными. Микротрещины сдвига практически не наблюдаются при сдвиге без бокового поджатия. При сдвиге с боковым поджатием возникают микротрещины как сдвига, так и отрыва, угол наклона макротрещины скола составляет от 20 до 45° с направлением осевой силы в зависимости от величины боковой нагрузки.





Анализ микроструктуры показал, что область локализации микроповреждений начинает развиваться там, где имеется скопление близко расположенных пор и включений. На образцах из песчаника и искусственных геоматериалов, обладающих структурной неоднородностью в виде соответствующих минералогических включений, в процессе одноосного нагружения до разрушения были детально исследованы особенности распределения и эволюции их напряженно-деформированного состояния на микроуровне по рабочим поверхностям образцов лазерного измерительного породных с помощью оптикотелевизионного комплекса ALMEC-tv [6, 7]. Анализ экспериментальных данных показал, что несмотря на то, что заданным видом нагружения породного образца является одноосное сжатие с постоянной скоростью перемещения траверсы пресса, тем не менее, пространственно-временное поле микродеформаций является существенно неоднородным. На рис. 4 приведен характерный трехмерный график, соответствующий нагрузке 0,5 предела прочности образца, где по осям х и уотложены координаты поверхности образца в продольном и поперечном направлении соответственно, по оси z – величина микродеформации в соответствующей точке измерения сканируемой поверхности.

Эволюция деформационного поля показывает, что микродеформациив зоне будущего разрушения превышают средние значения по поверхности, кроме того их флуктуации также выше средних значений. На ранней стадии

нагружения микродеформации, превышающие средние по образцу значения локализуются вокруг слабой зоны и далее, по мере повышения нагрузки, в ней возникают микроповреждения и магистральный разрыв.



Рис. 4. Распределение микродеформации в продольном направлении по сканируемой поверхности образца в момент нагружения, соответствующий на диаграмме «напряжение – время» 0,5 предела прочности образца

Таким образом, в результате проведенного исследования можно заключить, что параметры структуры материала и вид нагружения взаимосвязаны с процессами внутреннего микродеформирования и являются определяющим в прогнозе зоны будущего макроразрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

2. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

3. ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.

4. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Методы определения предела прочности при объёмном сжатии.

5. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А. О некоторых особенностях эволюции напряженно–деформированного состояния образцов горных пород со структурой при одноосном нагружении. // ФТПРПИ. – 2013. – № 5.

6. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н. Об энергетическом подходе к анализу сложных деформационно-волновых процессов в геоматериалах со структурой под нагружением до разрушения. // Проблемы недропользования (ISSN 2316-1586). – 2014. – № 3.

© О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, 2015

УДК 622.235

ФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ МАССИВ С ЦЕЛЬЮ ЕГО ДЕГАЗАЦИИ

Михаил Николаевич Цупов

ООО «Шахта "Чертинская-Южная"», 652645, Россия, Кемеровская обл, г. Белово, 5-я рудничная, 90, горный мастер (участок аэрогазового контроля), тел. (903)942-72-57, e-mail: lion_ltd@ngs.ru

Андрей Владимирович Савченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории силовых электромагнитных импульсных систем, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Приведены результаты газового контроля на шахтах Кузбасса после сейсмических событий и проведен анализ влияния физических методов воздействия на угольный массив горных пород.

Ключевые слова: сейсмические события, газовый контроль, методы увеличения дебета газа.

PHYSICAL STIMULUS METHODS FOR COAL DEGASSING

Mikhail N. Tsupov

Chertinskaya-Yuzhnaya Mine, 652645, Russia, Kemerovo Region, Belovo, 90 5-ya rudnichnaya St., Overman, Air-and-Gas Control, tel. (903)942-72-57, 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, Ph. D. Eng, Senior Researcher, Laboratory for Power Electromagnetic Impulse-Forming Systems, tel. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

The authors describe data of gas control in Kusbass mines after seismic events and analyze physical methods of treatment of coal.

Key words: seismic event, gas control, gas recovery enhancement techniques.

Мировая практика показывает, что современные технологии дегазации пластов недостаточны для безопасной и своевременной отработки месторождений. Это вызывает необходимость более глубокого изучения существующих способов дегазации, а также проработки новых подходов к данной проблеме.

В ноябре 2011 года метан угольных пластов был признан самостоятельным полезным ископаемым и внесен в Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод. Скважинный способ добычи стал являться промышленным. Метан при этом рассматривается уже не как попутный продукт при добыче угля, а как самостоятельное полезное ископаемое. Разработка метаноугольных месторождений с добычей метана в промышленных масштабах производится с применением специальных технологий интенсификации газоотдачи пластов. По данным ООО «Газпром добыча Кузнецк», самые распространенные варианты – гидроразрыв пласта, закачка через скважину воздуха или газово-воздушной смеси, воздействие на пласт электротоком.

Основным способом дегазации, получившим широкое распространение как в РФ так и за рубежом, является гидроразрыв – местное разрушение массива угля для образования дополнительных поверхностей, что приводит к увеличению выхода летучих. Однако данная технология недостаточно эффективна для современной промышленности, например, в Казахстане от начала дегазации пласта угля до его отработки может пройти до нескольких лет. Это связано с снижением проницаемости угля по газу, более быстрым смыканием трещин от гидроразрыва с ростом глубины отработки. Другими словами, с увеличением горного давления разрушить пласт и поддерживать трещиноватость становится значительно сложнее, что приводит к удорожанию технологии и уменьшению положительного эффекта.

Поэтапная технология дегазации свиты угольных пластов скважинами с поверхности включает три этапа (рис. 1) [1].



Рис. 1. Поэтапная технология дегазации свиты угольных пластов скважинами с поверхности:

I – ГРП и другие активные воздействия на неразгруженную свиту пластов; II – освоение скважин (извлечение воды и метана); III – дегазация подработанного массива

Имеется множество фактов, подтверждающих положительное влияние сейсмических событий на повышение дебетов скважин.

Косвенно о влиянии вибрации на угольный массив можно судить по реакции месторождения на сейсмические события, происходившие в регионе. Землетрясение, произошедшее в Кузбассе 19 июня 2013 г. в 6:02 по местному времени (3:02 по московскому времени) стало крупнейшим в регионе за последние 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. 2) 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 м *16м².



Рис. 2. График повышенного метановыделения после землетрясения (пояснения в тексте)

Также после сейсмического события увеличилась средняя концентрация метана в исходящей струе лавы с 0,099 до 0,249. Измерения проводились до землетрясения и после, в период, когда работы в шахте по разрушению угля не выполнялась.

И как следствие, произошло увеличение содержания метана в исходящей струе крыла шахты (рис. 3).

На вторые сутки концентрация метана вернулась к своему среднемесячному уровню. Подобных скачков содержания летучих не наблюдалось до землетрясения, так и после него. При этом в шахте отсутствовало видимое разрушение угля, что свидетельствует о том, что дегазация горного массива угля может происходить и без его разрушения.



Рис. 3. Рост содержания метана в исходящей струе крыла шахты (ходок центрального бремсберга (наклонный ствол))

Практическое подтверждение эффективности виброволнового воздействия на метаноугольные пласты с целью увеличения притока газа получено на Талдинском месторождении в Кузбассе, лицензионный участок ООО «Газпром добыча Кузнецк».

Испытания технологии объемного волнового воздействия на метаноугольные пласты проведены в сентябре 2012 года. Оценка эффективности воздействия осуществлялась геофизической партией ООО «Красноярскгеофизика» посредством геофизических измерений комплексными приборами КСА-T12. Наблюдения выполнялись до волнового воздействия (фоновые замеры) и после воздействия, т.е. по схеме «до-после». Анализ результатов показал успешность выполненной работы – увеличение дебита газа на 19,8 % [2].

В условиях Карагандинского бассейна проведены испытания на интенсификацию газоотдачи в режиме кавитации [1]. Технология основана на самоподдерживающемся разрушении угля. При обработке скважин №25 и №27 отмечен ускоренный выход метана. Максимальный дебит скважин составил до 1 м³, средний 0,25-0,6м3

На шахте «Краснодонецкая» в дегазационной скважине ГГТ-4 проведены исследования и эксперимент по акустическому воздействию [1], осуществлённому при частоте 22-44кГц. Отчётливо зафиксировано увеличение выхода летучих по результатам отбора проб.

Известны опыты по воздействию на уголь ультразвуком [1], что привело к увеличению выхода летучих на 10%. Существуют такие методы как: бароградиентный, гидроимпульсный, депрессионный, рециклинговый. Эффективность данных методов доказана лабораторными и экспериментальными исследованиями, но ни один из способов не получил широкого применения в добывающей промышленности.

Разнообразие методов дегазации и их малую эффективность можно связать с недостаточной изученностью угля из-за его сложного строения. Существует несколько теорий о структуре угля:

уголь - трехмерная совокупность соприкасающихся образований;

уголь - основная единица – молекула.

Также существует теория о геохимической концепции природы метановыделения, которая находит всё больше сторонников. При разном строении угольной толщи необходим и разный подход к вопросам дегазации угольного массива.

Соответственно при дегазации угольного пласта, с применением гидроразрыва, получаем увеличение выхода летучих, но возникают вопросы: можно ли увеличить эффективность данного способа до полного выделения метана из угольного массива? Возможно ли воздействие на этот же участок угольного массива другим методом, например, ультразвуком, с целью увеличения выделения метана из угля. Другими словами, нам известно о положительном эффекте некоторых способов воздействия на угольный массив, но возможно для наибольшей эффективности необходимо комплексное воздействие несколькими способами одновременно или последовательно. Так же необходимо разрабатывать новые подходы к данным вопросам.

В связи с вышесказанным возникает необходимость более глубокого изучения, как каждого способа в отдельности, так и комплексного воздействия на угольный массив несколькими методами дегазации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. // – Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель». – 2011.

2. Комлева Е.В. Разработка комплексных многофакторных волновых технологий интенсификации процессов добычи нефти и газа. / Дис. на соиск. ученой ст. канд. техн. наук. – Уфа: ВолгоУралНИПИгаз. – 2014.

© М. Н. Цупов, А. В. Савченко, 2015

КРИТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ЗАДАЧЕ О ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДО И ЗА ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-97-50, e-mail: belousova_o@ngs.ru

Ольга Анваровна Лукьяшко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, инженер, тел. (383)335-97-50, e-mail: lykola@yandex.ru

Решается задача о потере устойчивости цилиндрических оболочек (крепей цилиндрической формы) при совместном действии осевой сжимающей нагрузки, кручения и бокового давления. Для заданных размеров оболочки находятся комбинации нагрузок, при которых происходит потеря устойчивости. Полученные комбинации таковы, что в предельных переходах они вырождаются в известные формулы отдельно для сжатия, кручения, внешнего давления. Эти комбинации рассматриваются для исследования устойчивости оболочек в их пластическом состоянии.

Ключевые слова: оболочки, устойчивость, сжатие, кручение, внешнее давление, пластичность.

CRITICAL LOADS IN THE PROBLEM ON INSTABILITY OF CYLINDRICAL SUPPORT IN PRE- AND POST-LIMIT OF ELASTICITY

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, 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, Ph. D. Eng, Researcher, tel. (383)335-97-50, e-mail: belousova_o@ngs.ru

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

The authors solve the problem on stability loss in cylindrical shells under joint action of axial compression, torsion and lateral pressure. For the preset size shells, the combinations of loads that cause loss of stability are found. The combinations are such that in the limiting case they degenerate

in the known individual formulas for compression, torsion and external pressure. The applicability of the found combinations to analyzing stability of shells in plastic state is considered.

Key words: shells, stability, compression, torsion, external pressure, plasticity.

Рассматривается математическая модель сложного догружения предложенная в [1]. Суть модели следующая: имеется девиаторное пространство, в котором девиатор напряжений D_{σ} изображается виде вектора (рис.1) [2].



Рис.1. Девиаторное пространство и три области догружения: *I* - область полной разгрузки,

II - область частичной разгрузки,

III - область полной догрузки

Аналогично в виде вектора изображается девиатор деформаций. Согласно [1] вся область догружения на рис.1 представляется состоящей из трех подобластей: в области I соотношения между приращениями деформаций и приращениями напряжений имеют вид закона Гука:

 $D_{\Delta\varepsilon} = \frac{1}{2\mu} D_{\Delta\sigma}; \quad (1)$

в области II существует ортогональный базис, по одному из направлений кото-

рого, граничащего с областью I, справедливо (1), а по другому ортогональному направлению, граничащему с областью III, справедливо соотношение

$$D_{\Delta\varepsilon} = \frac{1}{2\mu_p} D_{\Delta\sigma}, \qquad (2)$$

где $D_{\Delta\varepsilon}$, $D_{\Delta\sigma}$ - приращения девиаторов, 2μ - упругий модуль сдвига, $2\mu_p$ - касательный модуль на диаграмме $|D_{\sigma}| \sim |D_{\varepsilon}|$, зависящий только от длины девиатора D_{σ} , то есть от $|D_{\sigma}|$: $2\mu_p = 2\mu_p(|D_{\sigma}|)$. В области III справедливо (2). В этой математической модели раствор угла 2χ , характеризующий область III, также зависит от $|D_{\sigma}|$. Эти соотношения проверялись с использованием многочисленных экспериментальных данных, полученых при сложном нагружении (эксперименты Жукова А.М., Работнова Ю.Н.,Жигалкина В.М., Нахди и Роули, Будянского и др.). Получено удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных результатов.

Что объединяет области I и III? Это – то, что соотношения между приращениями напряжений и приращениями деформаций здесь одинаковы по виду (ср. (1) и (2)). Последнее означает возможность использования соотношений (2) в решениях задач потери устойчивости пластин и оболочек с однородным до-

272

критическим состоянием по следующей схеме: в решении упругой задачи упругий модуль сдвига заменяется на касательный $2\mu_p$. Получаемые нагрузки называются нижними критическими нагрузками [3].

Для обоснования предлагаемых решений используется гипотеза Ф. Шенли и Ю.Н. Работнова о продолжающемся в момент потери устойчивости нагружении, согласно которой тензор основных напряжений T_{σ}^{0} получает приращение ΔT_{σ} , которое представимо в виде: $\Delta T_{\sigma} = \delta T_{\sigma}^{0} + \Delta \tilde{T}_{\sigma}$, где δT_{σ}^{0} - произвольная постоянная вариация тензора T_{σ}^{0} , а $\Delta \tilde{T}_{\sigma}$ - приращение, вызванное искривлением поверхности оболочки, оно определяется с точностью до произвольного постоянного множителя. За счет этого обстоятельства можно всегда добиться того, что догрузка в каждой точке оболочки будет направлена в одну из трех областей, указанных на рис. 1.

Приведем некоторые моменты получения критических комбинаций нагрузок в оболочке, представленные в [4]. Имеем основную формулу:

$$-h(\sigma_{x}^{0} - 2\lambda\tau_{xy}^{0} + \lambda^{2}\sigma_{y}^{0}) = = (m^{2}\pi^{2}/l^{2}) \cdot (\alpha_{1} + \lambda\alpha_{2} + \lambda^{2}\alpha_{3} + \lambda^{3}\alpha_{4} + \lambda^{2}\alpha_{5}) + (3) + \frac{hl^{2}}{m^{2}\pi^{2}R^{2}(\beta_{1} + \lambda\beta_{2} + \lambda^{2}\beta_{3} + \lambda^{3}\beta_{4} + \lambda^{2}\beta_{5})}.$$

Она получена из дифференциальных уравнений задачи в предположении, что при воздействии на цилиндрическую оболочку комбинированных нагрузок – внутреннего (внешнего) давления σ_y^0 , осевого сжатия σ_x^0 и кручения τ_{xy}^0 , образуются выпучины винтообразного характера: $\omega = \omega_0 \sin(m\pi x/l - ny/R)$, ω - прогиб. Так как $\int_0^{2\pi R} \omega \Big|_{x=0,l} dy = \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right) \Big|_{x=0,l} dy = 0$, то считается в [5], что

данное решение относится к случаю шарнирного опирания оболочки.

Относительно введенных обозначений отметим, что здесь σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 - мембранные напряжения в оболочке в момент потери устойчивости (они константы), h - толщина, l - длина, R - радиус оболочки, $\lambda = \frac{nl}{m\pi R} = \frac{l_x}{l_y}$ ($l_x = \frac{l}{m}$ длина полуволны изогнутой поверхности по образующей, $l_y = \pi R/n$ - длина полуволны вдоль дуги). Коэффициенты α_1 , α_2 , ..., β_5 определяются толщиной цилиндра и типом теории, описывающей свойства материала.

Когда $\lambda^2 >> 1$, то тогда из (3) следует

$$-h(\sigma_{x}^{0}-2\lambda\tau_{xy}^{0}+\lambda^{2}\sigma_{y}^{0})=\frac{m^{2}\pi^{2}}{l^{2}}\lambda^{4}\alpha_{5}+\frac{hl^{2}}{m^{2}\pi^{2}R^{2}\beta_{5}\lambda^{4}}.$$
(4)

Если (4) минимизировать по λ и m^2 при чистом осевом сжатии ($\sigma_x^0 = -\sigma$, $\sigma_y^0 = \tau_{xy}^0 = 0$), то критическое напряжение окажется равным [4]

$$\sigma_* = \frac{2}{Rh} \sqrt{\frac{\alpha_5 h}{\beta_5}}.$$
 (5)

При попереченом внешнем давлении [4] $\sigma_* = \frac{4\pi}{3l} \frac{1}{h\sqrt{R}} \sqrt[4]{\frac{3\alpha_5^3 h}{\beta_5}}$. (6)

В случае чистого кручения [4] $\tau_* = \frac{4}{3hR^{\frac{3}{4}}} \sqrt{\frac{\pi}{l}} \left(\frac{3\alpha_5}{5}\right)^{\frac{5}{8}} \left(\frac{h}{\beta_5}\right)^{\frac{5}{8}}.$ (7)

Приведем другие критические комбинации напряжений. Эти решения содержат в себе как частные решения (5) – (7).

1. Осевое сжатие и внешнее давление ($\tau_{xy}^{0} = 0$). Разрешим (4) относительно

$$\sigma_{y}^{0}: \qquad \sigma_{y}^{0} = -\frac{m^{2}\pi^{2}\alpha_{5}}{l^{2}h}\lambda^{2} - \frac{l^{2}}{m^{2}\pi^{2}R^{2}\beta_{5}\lambda^{6}} - \frac{\sigma_{x}^{0}}{\lambda^{2}}.$$
(8)

Минимизируя (6) по λ^2 , найдем

$$\lambda^{2} = \frac{l}{m\pi} \sqrt{\frac{h}{2\alpha_{5}}} \left[\sigma_{x}^{0} \pm \sqrt{(\sigma_{x}^{0})^{2} + \frac{l2}{R^{2}h} \frac{\alpha_{5}}{\beta_{5}}} \right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (9)$$

$$\sigma_{y}^{0} = -2m\frac{\pi}{l}\sqrt{\frac{2\alpha_{5}}{h}}\frac{\sigma_{x}^{0}\left[\sigma_{x}^{0} + \sqrt{(\sigma_{x}^{0})^{2} + \frac{12}{R^{2}h}\frac{\alpha_{5}}{\beta_{5}}}\right] + \frac{4\alpha_{5}}{hR^{2}\beta_{5}}}{\left[\sigma_{x}^{0} + \sqrt{(\sigma_{x}^{0})^{2} + \frac{12}{R^{2}h}\frac{\alpha_{5}}{\beta_{5}}}\right]^{\frac{3}{2}}}$$

Отсюда, если $\sigma_y^0 \neq 0$, то m = 1. Зависимость (8) – искомая.

2. Осевое сжатие и кручение ($\sigma_y^0 = 0$). Разрешив (4) относительно τ_{xy}^0 , имеем $\tau_{xy}^0 = \frac{m^2 \pi^2}{2hl^2} \alpha_5 \lambda^3 + \frac{l^2}{2m^2 \pi^2 R^2 \beta_5 \lambda^4} + \frac{\sigma_x^0}{2\lambda}$. Минимизируя по λ аналогично

предыдущему, получим

$$\tau_{xy}^{0} = \frac{2}{3} \left(\frac{6m^{2}\pi^{2}\alpha_{5}}{hl^{2}} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{\sigma_{x}^{0} \left[\sigma_{x}^{0} + \sqrt{(\sigma_{x}^{0})^{2} + \frac{60\alpha_{5}}{hR^{2}\beta_{5}}} \right] + \frac{12\alpha_{5}}{hR^{2}\beta_{5}}}{\left[\sigma_{x}^{0} + \sqrt{(\sigma_{x}^{0})^{2} + \frac{60\alpha_{5}}{hR^{2}\beta_{5}}} \right]^{\frac{5}{4}}}.$$

Отсюда в случае $\tau_{xy}^0 \neq 0$ следует, что m=1 и как частные вытекают решения (5), (7).

С помощью этих формул можно оценить критические нагрузки крепей цилиндрической формы за пределом упругости с использованием [1].







Рис. 3. Диаграммы расчетных напряжений для оболочек: линия 1- расчет по предложенной модели, линия 2 - расчет по деформационнной теории пластичности, 3- по теории пластического течения, линия 4 –по нелинейной теории p,

 \hat{q} - безразмерные параметры

Направим девиатор догрузки $D_{\Delta\sigma}$ в момент потери устойчивости оболочки в каждой ее точке в область III – область полной разгрузки. Тогда определяющие соотношения имеют вид (1). Это означает, что критические параметры оболочки будут определяться из решения упругой задачи. Соответствующие нагрузки называются верхними критическими нагрузками. Если направить девиатор догрузки $D_{\Delta\sigma}$ в область II, то критические нагрузки здесь будут меньше верхних. Направим, наконец, девиатор полной догрузки $D_{\Delta\sigma}$ в момент потери устойчивости оболочки в область I. Тогда получаем нижние критические нагрузки. Приведенные ниже примеры решения задачи при чистом осевом сжатии оболочки (рис. 2) и при комбинированного действии на нее осевого сжатия и внутреннего давления (рис.3) показывают, что эти критические значения являются минимальными по величине из всех возможных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чанышев А.И. Об одной модели пластического деформирования горных пород при сложном нагружении (пространственный случай). // ФТПРПИ. – 1985. – №1.

2. Христианович С.А., Шемякин Е.И. К теории идеальной пластичности. – МТТ. – 1967. – № 2.

3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука. – 1969.

4. Григолюк Э.И. О выпучивании тонких оболочек за пределами упругости. – Изв. АН СССР. – ОТН. – 1957. – № 10.

5. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука. – 1967.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко, 2015

БЛОЧНЫЕ МОДЕЛИ ГЕОСРЕД И ИХ АНАЛИЗ

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «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

Приводится обзор различных моделей геосред в применении к построению определяющих соотношений упругости, пластичности и разрушения. Отмечаются их недостатки, достоинства. Рассматривается сценарий построения блочных моделей геосред с первоначальной анизотропией.

Ключевые слова: модели геосред, упругость, пластичность, разрушение, анизотропия.

ANALYSIS OF BLOCK MODELS OF GEOMEDIA

Anvar I. Chanyshev

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

The paper reviews various models of geomedia in the context of construction of constitutive equations for elasticity, plasticity and failure. The author identifies advantages and disadvantages of the models. Scenario of constructing block models of initially anisotropic geomedia is considered.

Key words: geomedium model, elasticity, plasticity, failure, anisotropy.

Существуют различные модели деформируемых сред. На рис. 1 схематично представлена модель тела, состоящая из некоторых несгибаемых стержней с жесткостью *E* (*E* – модуль Юнга).

Понятно, что эта модель есть модель анизотропного тела, поскольку направления стержней ориентированы параллельно осям системы координат *хОу* и деформации могут происходить вдоль них. При сжатии или растяжении такой модели усилиями σ_x , σ_y будем иметь деформации

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x}, \ \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y}.$$
 (1)

Если жесткости E_x и E_y совпадают, то деформации ε_x и ε_y будут совпадающими при одних и тех же усилиях $\sigma_x = \sigma_y$. Далее рассмотрим сдвиг этой модели касательными усилиями τ_{xy} . Если соединение стержней в узлах абсолютно жесткое, то в силу несгибаемости никакого сдвига не получится. Однако, если допустить, что стержни соединены между собой так, как показано на рис. 2 (вид сверху), то есть в этих стержнях просверлены отверстия, в которые вставлены болты, на которые надеты гайки и с помощью которых стержни оказались прижатыми друг к другу нормальным давлением *P*, то тогда возможен сдвиг. Для того, чтобы произошел сдвиг одних стержней относительно других, необходимо преодолеть усилие трения, равное

$$\tau_{xv} = P \cdot k_{mp}, \qquad (2)$$

где *k_{mp}* – коэффициент трения при вращении одного стержня относительно другого.



Рис. 1. Стержневая модель тела

Приложенную силу P можно считать здесь величиной постоянной. Коэффициент трения k_{mp} , как известно, зависит от сдвига γ .

Раскладывая эту функцию в ряд по степеням у, получаем зависимость

$$\tau_{xy} = 2\mu\varepsilon_{xy},\tag{3}$$

где $2\varepsilon_{xy}$ - сдвиг γ , μ - коэффициент пропорциональности.



Рис. 2. Болтовое соединение стержней (вид сверху)

Сочетая (1), (3), получаем двух константную стержневую модель тела. Особенностью этой модели тела является то, что сдвиг $2\varepsilon_{xy}$ не зависит от нормальных напряжений σ_x, σ_y .



Рис. 3. Блочная модель среды

Другое дело, когда имеет место блочная модель среды, изображенная на рис. 3.

На рис. З σ_y – нормальная нагрузка в плоскости контакта блоков, τ_{xy} - касательная нагрузка, есть коэффициент трения $k_{\tau p}$ между блоками. В этом случае, также как в случае (2), имеем соотношение

$$\tau_{xy} = \sigma_y k_{mp} \,. \tag{4}$$

Отличие от (2) состоит в том, что величина σ_y - не константа. Более того, при сжатии, например, величина σ_y - отрицательна, при растяжении – положительна (чего не может быть при учете трения, трение предполагает прижатие одних блоков к другим!). Отметим, что в случае сжатия при условии (4) предельная сила трения τ_{xy} получается в нелинейной зависимости от сдвига γ даже при малых его значениях: $\tau_{xy} = \alpha \sigma_y 2\varepsilon_{xy} = \alpha \sigma_y \gamma$, где α - коэффициент разложения k_{τ_p} в ряд по степеням γ .

Для того чтобы ситуацию вернуть в нормальное положение, необходимо допустить, что еще до приложения нагрузок σ_y , τ_{xy} блоки на рис.3 прижаты друг к другу некоторыми усилиями N (это могут быть межмолекулярные, межатомные силы, силы поверхностного натяжения!). За счет этих усилий (в направлении оси y) возникают деформации

$$M = \frac{N}{K},\tag{5}$$

где *К* - модуль жесткости. Если теперь допустить, что в направлении нормали к контактам приложены еще усилия σ_y , то суммарно на этой площадке получим значение усилий $N + \sigma_y$, которое вызовет деформацию $M + \varepsilon_y$. Вычитая из соотношения $M + \varepsilon_y = N + \sigma_y/K$ соотношение (5), получим $\varepsilon_y = \sigma_y/K$, то есть сюда не входит нагрузка *N*. С другой стороны, рассматривая предельную силу трения на этой площадке, имеем

$$\tau_{xy} = (N + \sigma_y) k_{mp}. \tag{6}$$

Если в (6) считать, что сила *N* много больше, чем σ_y , то тогда, пренебрегая σ_y по сравнению с *N*, получаем $\tau_{xy} \approx Nk_{mp}$. Здесь, как в предыдущем случае (рис.2), считаем *N* константой или величиной, зависящей от сдвига γ , получаем в итоге в упругости связь (3) и в случае необратимых деформаций зависимость $\tau_{xy} = f(\varepsilon_{xy})$, не зависящую от напряжения σ_y и характеризующую изменение предельной силы трения τ_{xy} от величины ε_{xy} . Схематичный график этой зависимости представлен на рис. 4.

Несколько слов о существующих моделях блочных сред. Из всего многообразия выделим несколько моделей. Первая модель - модель С.А. Христиановича и Е.И. Шемякина [1,2]. В [1,2] постулируется, что в результате неупругого деформирования первоначально однородный и изотропный материал становится анизотропным. Если 1,2,3 – главные оси тензора напряжений и деформаций (предполагается, что оси тензоров в процессе



Рис. 4. График изменения предельной силы трения τ_{xy} с ростом ε_{xy}

нагружения совпадают), то эта анизотропия определяется законом вида:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_1 = a_{11} \Delta \sigma_1 - a_{12} \Delta \sigma_2 - a_{13} \Delta \sigma_3, \\ \Delta \varepsilon_2 = -a_{21} \Delta \sigma_1 + a_{22} \Delta \sigma_2 - a_{23} \Delta \sigma_3, \\ \Delta \varepsilon_3 = -a_{31} \Delta \sigma_1 - a_{32} \Delta \sigma_2 + a_{33} \Delta \sigma_3. \end{cases}$$

Из этих соотношений составляются разности типа

$$\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_3 = (a_{11} + a_{31}) \Delta \sigma_1 + (a_{32} - a_{12}) \Delta \sigma_2 + (a_{33} + a_{13}) \Delta \sigma_3$$

Величины $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ переписываются в виде: $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma + 2(\Delta T_{12} + \Delta T_{13})/3$, $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma + \dots$, где $\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3/3$, $\Delta T_{12} = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2/2$, $\Delta T_{13} = \dots$. Предполагается, что величина приращения гидростатического напряжения $\Delta\sigma$ не влияет на приращения главных сдвигов и в том числе на величину $\Delta\Gamma_{13} = \Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3$, то есть комбинации податливостей вида $a_{11} + a_{31} + a_{32} - a_{12} + a_{33} + a_{13}$ здесь зануляются и тогда получается, что приращение сдвига, например, на площадке максимального касательного напряжения $\Delta\Gamma_{13} = \Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3$ зависит не только от приращения собственного касательного напряжения ΔT_{13} , но и от приращений касательных напряжений на других площадках скольжения ΔT_{12} , ΔT_{23} (анизотропия пластического состояния). При этом различаются состояния полной и неполной пластичности. В результате в пластическом состоянии в случае неполной пластичности материал площадками максимального касательного напряжения «режется» на призмы, а в случае полной пластичности «режется» двумя системами площадок скольжения на некоторые элементы (блоки), грани которых совпадают по направлению с площадками T_{13} или T_{12} , или T_{23} . Особенность этой модели такова. Пусть на площадках τ_{\max} касательное напряжение T_{13} больше предела упругости материала T_s , то есть $T_{13} > T_s$. Понятно, что по непрерывности касательное напряжение τ_n будет больше предела упругости T_s и на некоторых других площадках с нормалью n. Вопрос: почему эти площадки не «работают», то есть пластические сдвиги там не происходят?

В этом смысле более предпочтительней выглядят теории скольжения [3-5], где сдвиги происходят на всех площадках, где $|\tau_n| > T_s$. Вопрос здесь один: почему здесь интегрируются (суммируются) сдвиги, относящиеся к площадкам с разными нормалями? Ведь сдвиг – по существу компонента вектора деформации $\breve{q} = \varepsilon_{ij}n_j\breve{e}_i$ (\breve{e}_i - орты системы координат xOyz). Как можно складывать векторы деформации (или их проекции) на площадках с разными нормалями \breve{h} ?

Можно рассматривать блоки, связанные друг с другом упругой прослойкой [6-7]. Если к такой блочной среде приложить нагрузки, то основная деформация произойдет в прослойках, причем деформации здесь будут большие. А для больших деформаций, как известно, требуется учет порядка их изменений [8], т.е. в прослойках необходимо вводить не малые, а большие деформации.

Другой вариант блочной модели среды рассматривается в [9-10], где блоки перемещаются друг относительно друга за счет преодоления сил трения и где учитывается первоначальная анизотропия материала. Основным здесь является применение понятия «собственные состояния упругости».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Христианович С.А. Деформация упрочняющегося пластического материала. // Известия РАН.– Механика твердого тела.– 1974.– № 2.

2. Шемякин Е.И. Анизотропия пластического состояния. – ЧММСС.– 1973. – Т. 4, № 4.

3. Батдорф С.Б., Будянский Б. Математическая теории пластичности, основанная на концепции скольжения. – Механика. период. сб. перев. иностр. Статей. – 1962. – №1.

4. Линь Т.Г. Физическая теория пластичности. // Механика. Новое в зарубежной науке. Сер. 7, Проблемы теории пластичности. – М.: Мир. – 1976.

5. Клюшников В.Д. Теория пластичности: современно е состояние и перспективы.- Изв. РАН. МТТ. – 1993. – № 2..

6. Сарайкин В.А Распространение низкочастотной составляющей волны в модели блочной среды. // ПМТФ. – 2009. – Т.50. – № 6.

7. Сарайкин В.А. Учет упругих свойств блоков в низкочастотной составляющей волны возмущений, распространяющейся в двумерной среде. // ФТПРПИ. – 2009. – № 3.

8. Мусхелишвили Н.И.Некоторые основные задачи математической теории упругости. – Москва. – 1966.

9. Чанышев А.И. Блочная феноменологическая механическая модель элемента деформируемой среды. Часть 1,2. // ФТПРПИ. – 1998.– № 4,5.

10. Чанышев А.И. Блочная феноменологическая механическая модель элемента деформируемой среды. Ч.З: Первоначально анизотропные среды. // ФТПРПИ. – 1999. – № 4.

© А. И. Чанышев, 2015

УДК 539.375

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ УДАРЕ КЛИНОВИДНОГО ИНСТРУМЕНТА

Евгений Николаевич Шер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, тел. (383)365-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Виктор Прокопьевич Ефимов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, тел. (383)365-96-54, e-mail: vzrivlab@misd.nsc.ru

Проведено экспериментальное и теоретическое моделирование развития трещины, возникающей при внедрении жесткого клина в хрупкую горную породу. Эксперименты проводились на образцах из оргстекла, что позволяло фиксировать размеры и форму трещин. Нагружение клина проводилось квазистатически в испытательной машине и динамически падающим клином. Для теоретического описания процесса развития трещины разработана в рамках трехмерной теории упругости расчетная схема, учитывающая конечный размер режущей кромки клина и влияние свободной поверхности. Проведено сопоставление форм трещин, полученных теоретически и в эксперименте.

Ключевые слова: трещина, удар, клин, горная порода, свободная поверхность, трехмерная постановка, теория упругости, эксперимент.

MODELING GROWTH OF FRACTURE IN ROCKS UNDER WEDGE IMPACT LOADS

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, tel. (383)365-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Victor P. Efimov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, tel. (383)365-96-54, e-mail: vzrivlab@misd.nsc.ru

The authors have modeled theoretically and experimentally the growth of a fracture made in a brittle rock material by a penetrating rigid wedge. The experiments used specimens made of organic glass, which allowed tracing the size and shape of fractures. The loading was implemented with a quasistatic wedge in a testing machine, or with a dynamic drop wedge. For the theoretical description of the fracture growth process, an analytical model has been developed in the framework of three-dimensional elasticity theory, considering final dimension of the wedge edge and influence of the free surface. The theoretically and experimentally obtained shapes of fractures are compared.

Key words: fracture, impact, wedge, rock, free surface, three-dimensional formulation, elasticity theory, experiment.

Для совершенствования существующих и разработки новых способов разрушения горных пород механическим способом актуальным является разработ-

ка расчетных схем описания взаимодействия рабочего органа машины и горной породы. В настоящей работе проводится моделирование процесса развития разрушения при внедрении клиновидного инструмента в хрупкую горную породу. В плоской постановке задача о развитии трещины при нормальном к поверхности ударе клином рассмотрена в [1]. В работе [2, 3] приведена также в плоской постановке задачи расчетная схема развития трещины в хрупкой горной породе при ударе клиновидным инструментом под уступ. Целью таких исследований является разработка методов расчета рациональных параметров машин ударного действия, таких как ударные молоты, предназначенные для разрушения негабарита, послойного скалывания горной породы в ковшах экскаваторов активного действия [4]. Применительно к указанной задаче более адекватным процессу развития трещины при ударе клином заданной ширины может служить рассмотрение его в трехмерной постановке. С целью разработки такого подхода и визуализации процесса развития трещины исследования производились на прозрачном материале – органическом стекле. Для проведения испытаний были изготовлены прозрачные прямоугольные образцы с размерами 170х115х33 мм. Динамические эксперименты проводились с использованием гравитационного копра, рабочий инструмент которого был выполнен в виде клина с углом заострения 30° . Масса индентора была 2,3 кг, ширина $2b_{\circ}$ клиновидной части 28 мм. На верхний торец индентора крепился акселерометр, сигнал с которого через АЦП Е-1440 записывался в компьютер. Серия испытаний, целью которых было определение характерных размеров трещин, образовавшихся от удара клина, была проведена следующим образом. Клин сбрасывали сначала с высоты порядка 5 см без образования трещины под клином, затем высоту постепенно увеличивали. Начиная с высоты 7см, под клином образовывались магистральные трещины. Их подкрашивали для контраста и измеряли характерные размеры: глубину проникания и ширину. Высоту увеличивали до выхода трещины на свободную поверхность, что произошло при высоте падения клина, равной 40 см. Полученные характеристики трещин в зависимости от интенсивности удара приведены в табл.

Таблица

Н, см	$V_{\rm yд}$, м/с	a_{max} , M/c^2	F_{max} , H	$\Delta \tau$, ms	ℓ_{TP} , MM	$2b_{ ext{tp}}$, мм
10	1.4	2369	5448	1.4	3.5	29
12	1.5	2523	5804	1.6	5.5	33
15	1.7	2269	5219	1.44	6.5	37
20	1.98	2857	6571	2	7.0	33
25	2.2	3071	7064	1.96	10	39
30	2.4	3453	79040	2.2	12	45

Развитие трещины под клином при динамическом воздействии

Здесь: H – высота падения клина, V_{yg} – начальная скорость удара, a_{max} – максимальное значение ускорения при торможении клина, F_{max} – максимальное

усилие нагружения, $\Delta \tau$ – полное время нагружения, $\ell_{\rm тp}$ – длина трещины, $b_{\rm тp}$ – полуширина трещины на свободной поверхности.

Пример, образующейся при ударе клином трещины приведен на рис. 1.

Статические эксперименты проводились на испытательном стенде УМЭ-10ТМ. Нагружение производилось клином с углом заострения 30⁰, ширина лезвия была уменьшена до 13,5 мм. Скорость внедрения 0,5 мм/мин, нагружение производили до первого проскока магистральной трещины (рис. 2).



Рис. 1. Фотография трещины, образовавшейся от удара клином, сброшенного с высоты 12 см на горизонтально расположенный образец

Рис. 2. Фотография трещины, образовавшейся при статическом внедрении клина

Полученные в экспериментах данные позволяют оценить форму и размеры трещин, возникающих при ударе и статическом внедрении клина. Как следует из табл. 1 и рис. 1, 2, форма трещины в плане представляется овалом, описанным вокруг полоски, образованной внедренной частью клина.

При теоретическом описании развития трещины при внедрении клина будем считать, что в упругом полупространстве имеется начальная плоская трещина, выходящая ортогонально на свободную поверхность и имеющая в плане форму узкого прямоугольника. Такая трещина моделирует внедренный пластически жесткий клин и с нее начинается развитие магистральной трещины. Последующее внедрение клина моделируется увеличением нормального напряжения действующего на берега начальной трещины.

Для расчетов трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с плоской трещиной, выходящей на свободную поверхность и нагруженной по ее берегам внутренним давлением, использовался метод разрывных смещений [2, 7]. Согласно этому методу поверхность трещин разбивается на элементы, в пределах которых раскрытие и сдвиги берегов трещины считаются постоянными. Таким образом, трещины представляются набором дислокационных элементов, описываемых векторами Бюргерса, компоненты которых заранее могут быть неизвестны. Определяются они из требования выполнения граничных условий в напряжениях в центрах дислокационных элементов в результате решения соответствующей системы линейных уравнений, коэффициенты которой являются коэффициентами взаимного влияния элементов друг на друга. Для вычисления коэффициентов влияния использовались формулы Пича-Келлера [8], представляющие компоненты тензора напряжений в произвольной точке упругого пространства рядом с дислокационным разрывом через контурные интегралы вдоль его границы.

В разработанной программе разбиение области трещины и неразрушенной среды в ее плоскости проводилось на квадраты с использованием квадратной сетки с шагом a. Расчетная схема задачи представлена на рис. 3. Принято, что свободная поверхность расположена в плоскости (x, z) при y = 0, трещина, развивающаяся от внедрения клина вдоль оси y, расположена в плоскости (x, y)и начальное ее положение отмечено затемненными квадратными элементами. При расчетах коэффициентов влияния дислокационных элементов трещины использовались свойства симметрии задачи относительно плоскостей (y, z)и (x, y). Так для определения влияния j-того квадрата на i-тый правого крыла трещины нормальные напряжения находились в центре i-того квадрата в результате суммирования напряжений от j-того элемента правого крыла трещины и соответствующего ему по симметрии элемента левого крыла (рис. 3).



Рис. 3. Схема разбиения трещины на дислокационные элементы

Для выполнения граничных условий на свободной поверхности вдоль нее вводилась свободная от нагрузок дополнительная трещина большого размера, значительно превосходившего длину режущей кромки клина.

Для сохранения свойств симметрии задачи разбиение дополнительной трещины в плоскости (y, z) также было проведено с учетом такой симметрии. Пример такого разбиения трещины, моделирующей свободную поверхность, приведен на рис. 3. Элементы $J_1 - J_4$ дополнительной трещины, расположен-

ные симметрично относительно осей x и z имеют соответствующие этой симметрии значения компонент векторов Бюргенса и, в частности, одинаковые раскрытия вдоль оси y. Это позволяет уменьшить в четыре раза число неизвестных при описании раскрытия элементов поверхностной трещины, учитывая ее разбиение только в первом квадранте.

Важным элементом расчета развития трещин является критерий разрушения среды на ее кромке. В качестве такого принимался критерий Новожилова. Согласно этому критерию развитие трещины происходит там, где усредненные по характерному размеру l_C растягивающие напряжения превосходят прочность среды на растяжение σ_{C} . В программе принималось, что шаг сетки разбиения трещин а равен l_C и усредненные значения напряжений в неразрушенной среде у кромки трещины в ее плоскости равны напряжениям в центрах квадратов, окружающих ее. Тот квадрат, где напряжение σ_{zz} превосходит σ_{C} , принимался разрушенным и присоединялся к трещине. Расчет развития трещины проводился по шагам. На каждом шаге расчетов для заданной конфигурации трещины и нагружения определялась матрица определяющей системы уравнений. В результате решения этой системы находились раскрытия трещины. Рассчитывались напряжения в центрах квадратов ближайшего окружения кромки трещины. Квадраты окружения, где по принятому критерию происходило разрушение, присоединялись к трещине. После запоминания новой формы трещины и коррекции параметров нагружения расчеты циклически повторялись. В результате определялась эволюция формы трещины при равновесном ее развития под действием возрастающей нагрузки, приложенной на берегах начальной трещины.

Пример такого расчета приведен на рис. 4, где изображены, начиная с начального положения, формы правого крыла развивающейся трещины.



Рис. 4. Последовательные положения фронта трещины (правое крыло) при внедрении клина в упругое полупространство

Для сравнения данных теории и эксперименте на рис. 5 приведены зависимости отношения глубины внедрения трещины к ее ширине на поверхности от относительной глубины. Получено хорошее совпадение данных расчета и эксперимента (см. табл.)





от безразмерного значения $l_{\rm TD}/b_0$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00156).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башеев Г.В., Ефимов В.В., Мартынюк П.А. Расчетная модель разрушения горных пород клиновидным ударным инструментом. // ФТПРПИ. – 1999. – № 5, С. 53–62.

2. Башеев Г.В. Расчетная модель откола куска горной породы при ударе клином под уступ. // ФТПРПИ.–2004. –№5, С. 77–89.

3. Шер Е.Н., Михайлов А.М. Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидроразрыве вблизи свободной поверхности. // ФТПРПИ. – 2008.– № 5, С. 53–62.

4. M.Peach and J.S.Koehler. The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them. // Physical Review. -1950-No.3-Vol. 80.

© Е. Н. Шер, В. П. Ефимов, 2015

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЖАТИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В БЛОЧНЫХ СРЕДАХ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Евгений Николаевич Шер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, тел. (383)365-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Анатолий Георгиевич Черников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, старший научный сотрудник, тел. (383)365-96-54, e-mail: vzrivlab@misd.nsc.ru

Экспериментальное исследование влияния внешнего сжатия блочной среды на процесс распространения волн перемещения при ударном нагружении проведено на одномерной модели – вертикальной сборке силикатных кирпичей, разделенных податливыми прослойками. Сборка размещалась в гидравлическом прессе, что позволяло создавать в ней продольное сжатие. Движение кирпичей регистрировалось с помощью встроенных акселерометров. Анализ полученных осциллограмм показал, что наиболее чувствительным к внешнему сжатию оказались значения скорости распространения волн, коэффициенты их затухания и спектральные характеристики.

Ключевые слова: блочный породный массив, поле сжатия, сейсмические волны, ударное нагружение, скорость распространение волн.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF COMPRESSION ON PROPAGATION OF WAVES IN BLOCK STRUCTURE MEDIA UNDER IMPACT LOADING

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Phys-Math, tel. (383)365-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Anatoly G. Chernikov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, tel. (383)365-96-54, e-mail: vzrivlab@misd.nsc.ru

The influence of external compression of a block structure medium on propagation of waves under impact loading is studied in the experiments on one-dimensional model represented by vertical package of lime bricks with yielding intermediate layers. The package was placed in a hydraulic press for longitudinal compression. Displacement of bricks was traced with in-build acceleration indicators. The analysis of the resultant oscillograms has shown that wave velocities, attenuation coefficients and spectral characteristics are the most sensitive relative to external compression.

Key words: block structure rock mass, compression fields, seismic waves, impact loading, wave velocities.

В последнее время в геомеханике и геофизике применяются подходы к описанию деформирования породного массива как блочной среды сложного

иерархического строения. Согласно этой концепции породный массив представляет собой систему вложенных друг в друга блоков разного масштабного уровня [1] разделенных прослойками. Часто прослойки между блоками представлены более слабыми, трещиноватыми породами. Наличие таких податливых прослоек приводит к тому, что деформирование блочного массива, как в статике, так и в динамике происходит в основном за счет деформации прослоек, что приводит к выделению в сейсмическом отклике на импульсное воздействие низкочастотных волн маятникового типа [2, 3].

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования волноводных свойств одномерных моделей блочных сред, представленных цепочкой упругих блоков, разделенных податливыми прослойками [4-6]. Показано, что для описания распространения волн в таких средах хорошим приближением является представление о движении блоков как недеформируемых тел. При этом достаточно точно описываются возникающие при импульсном воздействии низкочастотные волны маятникового типа. Как показали эксперименты, высокочастотные волны, характерные для собственных колебаний блоков достаточно быстро затухают.

Сравнение данных расчетов по разработанным моделям с экспериментом показали, что скорость распространения маятниковых волн, период, степень их затухания определяются массой блоков и существенно зависят от реологических свойств прослоек, которые в свою очередь зависят от внешнего, горного давления. Наличие взаимосвязи величины горного давления и параметров сейсмических волн открывает возможность контролировать горное давление по данным сейсмического каротажа.

В настоящей работе проводятся результаты модельных исследований влияния внешнего сжатия блочной среды на процесс распространения волн деформации при ударном нагружении.

В качестве модели блочной среды была использована вертикально расположенная одномерная сборка девяти силикатных кирпичей, размещенных в гидравлическом прессе. На шести кирпичах (2-5, 7) были установлены акселерометры KD91. Вся сборка приводилась в сжатое состояние при помощи гидравлического пресса на различных давлениях – от 0 до 12 МПа, что создавало в сборке сжатие до 90 кН и внешнее напряжение P до 6,5 МПа. На верхний кирпич усилие передавалось через муфту, внутри которой располагался ударник, с закрепленным на нем акселерометром 8309 фирмы Brüel & Kjær для фиксирования величины удара. Все акселерометры были подключены через усилители заряда 2635 фирмы Brüel & Kjær к АЦП Е-1440 и далее к компьютеру, на котором производилась запись сигнала и хранение данных. Фото установки приведено на рис.1.

Были проведены три серии испытаний – без прослоек между кирпичами, с резиновыми и гипсовыми прослойками. Пример записи ускорений кирпичей № 2, 4, 7 в сборке с резиновыми прослойками приведен на рис.2. Характерным для колебаний кирпичей вблизи точки приложения импульсного нагружения является возбуждение их собственных колебаний. По мере распространения
волны возмущения по сборке такие колебания затухают и тем быстрее, чем больше их частота. Вдали от точки удара в колебаниях кирпичей выявляется низкочастотная волна маятникового типа, определяемая их взаимодействием через податливые прослойки.

В результате обработки осциллограмм ускорений кирпичей определялись скорости распространения волны вдоль сборки, коэффициенты затухания колебаний и изменение их спектральных характеристик. Скорости волны в эксперименте определялись по моментам вступления сигнала на осциллограммах ускорения кирпичей и по моментам достижения максимального значения первого пика ускорения. Первая скорость характеризует распространения упругого сигнала по сборке, вторая, являясь групповой скоростью, соответствует распространению низкочастотной маятниковой волны.







Рис. 2. Осциллограммы ускорений кирпичей

Графики зависимостей значений скоростей распространения упругой и маятниковой волны (верхняя и нижняя кривая соответственно) от степени сжатия сборки кирпичей приведены на рис. 3-5. На рис. 3 представлен случай, когда между кирпичами сборки отсутствуют дополнительные прослойки. Рис. 4 соответствует случаю, когда в качестве прослоек использовалась вакуумная резина, рис. 5 – случаю прослоек из затвердевшего гипса. Из приведенных данных следует, что скорости распространения волн по сборке, заметно меньше продольной скорости упругих волн в материале кирпичей, равной 3100 м/с. При этом из рис. 2-3 следует, что такие скорости оказались для сборок без прослоек и с резиновыми прослойками достаточно близкими по величине и чувствительными к изменения значения давления сжатия на всем диапазоне его изменения.



Вариант сборки с гипсовыми прослойками (рис. 5) отличается меньшими скоростями волн, более медленным их увеличением с ростом сжатия и выходом при *P*>1МПа на постоянный уровень. Последнее, по-видимому, связано с разрушением гипсовых прослоек.



Рис. 5. (пояснения в тексте)

Другим параметром, характеризующим распространение колебаний в блочной среде, является степень их затухания по мере распространения. В качестве параметра, описывающего такое затухание, примем величину максимального ускорения, регистрируемого на данном блоке. На рис. 6 приведены графики зависимости максимального размаха ускорений на втором, третьем и четвертом кирпиче (кривые 1-3 соответственно) от степени сжатия стопки кирпичей с резиновыми прослойками при фиксированной энергии удара. Наблюдается заметное увеличение интенсивности колебаний с увеличением степени сжатия. Этот параметр также как и скорости распространения волн, может быть использован для контроля над изменениями внешнего сжатия. Одним из характерных параметров волн, проходящих через одномерную сборку кирпичей, подвергаемых одноосному сжатию, является длительность полупериода первого колебания в волновом пакете. Анализ осциллограмм ускорений отдельных кирпичей сборки показал, что по мере распространения волны по ней в передней части волнового пакета выделяются низкочастотные колебания, характерные для маятниковой волны.



Рис. 6. (пояснения в тексте)

Это можно видеть и на рис. 7, где приведены осциллограммы колебаний кирпичей № 3-5,7 в сборке с резиновыми прослойками при сжатии 1.7 МПа



Рис. 7. (пояснения в тексте)

Зависимость длительности T_1 полупериода первого колебания седьмого кирпича от степени сжатия сборки кирпичей с резиновыми прослойками приведена на рис. 8. Из приведенного графика видно, что T_1 быстро уменьшается с ростом сжатия до P = 0,5 МПа. При дальнейшем росте сжатия T_1 изменяется

незначительно, откуда следует, что этот параметр мало чувствителен к изменению сжатия при *P* > 1,0МПа

В заключение следует отметить:

1. Спектр возмущений в блочной среде, возникающих при импульсном нагружении, определяется частотами собственных колебаний отдельных блоков

и частотным спектром их коллективных движений. По мере распространения возмущений по сборке собственные колебания затухают и тем быстрее, чем больше их частота. Вдали от точки удара в колебаниях кирпичей выявляется низкочастотная волна маятникового типа, определяемая их взаимодействием через податливые прослойки.



Рис. 8. (пояснения в тексте)

2. Внешнее сжатие блочной среды оказывает большое влияние на скорости распространения волн, амплитуду колебаний при заданном воздействии. Эти параметры могут быть использованы для контроля над изменениями внешнего сжатия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы. // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4, С. 829–832.

2. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа U_µ. // ДАН СССР. – 1993. – Т. 333. – № 4, С. 3–13.

3. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования. // ФТПРПИ. – 1996. – № 4, С. 3–38.

4. Александрова Н.И. О распространении упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении. // ФТПРПИ. – 2003. – № 6, С. 38–47.

5. Александрова Н.И., Шер Е.Н. Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. – 2004. – № 6, С.49–57.

6. Александрова Н.И., Черников А.Г., Шер Е.Н. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5, С. 67–74.

© Е. Н. Шер, А. Г. Черников, 2015

МЕТОДЫ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

Владимир Федорович Юшкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной геофизики, тел. (383)217-07-16, e-mail: L14@ngs.ru

Рассматривается применение технологий 3D лазерного сканирования для создания моделей горной инфраструктуры карьеров и рудников, принятия технологических решений при добыче твердых полезных ископаемых и геомеханическом мониторинге горных массивов.

Ключевые слова: горный массив, 3D лазерное сканирование, геомеханический мониторинг, программные средства, горно-графическая документация.

3D MODELING TECHNIQUES IN STUDYING GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCK MASSES UNDER MINING

Vladimir F. Yushkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Dr Eng, Principal Researcher, Rock Geophysics Laboratory, tel. (383)217-07-16, e-mail: L14@ngs.ru

The author examines application of 3D laser scanning methods to modeling rock mass infrastructure in open pit and underground mines, and to technological decision-making in hard mineral mining and geomechanical monitoring of rock masses.

Key words: rock mass, 3D laser scanning, geomechanical monitoring, programming tools, mine-graphical documentation.

В настоящее время технологии 3D лазерного сканирования успешно внедряются в практику горного дела при добыче твердых полезных ископаемых. Современные программные продукты позволяют на основе объемных цифровых моделей геообъектов автоматизировать планирование, проектирование, прогнозирование и сопровождение горных работ [1–3]. Создание автоматизированных рабочих мест (АРМов) по ведению горных работ, формирование баз данных проходки горных выработок и опробования скважин, интерпретация геофизической информации, обработка маркшейдерских измерений, – вот далеко не полный перечень использования данных лазерного сканирования.

При выборе программных средств (ПС) для геомеханических исследований в горном деле и совершенствования на их основе современных геотехнологий необходимо руководствоваться тем, чтобы существующие и вновь создаваемые ПС позволяли обеспечить: построение 3-мерных моделей горногеологической инфраструктуры подземных и открытых горных работ; мониторинг сейсмоакустических событий по предупреждению горных ударов на подземных горных работах; формирование документации в электронном виде с возможностью вывода графической информации на печать в принятых для горно-графической документации условных обозначениях; использование данных 3D лазерного сканирования для проектирования и ведения горных работ.

В ИГД СО РАН программно-технические средства современных технологий 3D лазерного сканирования применяются при исследованиях структурноиерархического строения и геомеханических свойств блочных геосред [46]. Известные программные продукты Cyclone, I-Site Studio и Auto CAD, используемые в геодезии, горном деле и техническом проектировании, составляют основу интегрированного пакета программных средств для создания автоматизированных рабочих мест исследователей – геомехаников, геологов, геофизиков, маркшейдеров, горных инженеров; позволяют производить накопление и использование горно-геологической и графической информации в геотехнологиях, выполнять отрисовку положений уступов и забоев карьеров и рудников по данным лазерного сканирования и маркшейдерской съемки для принятия и корректировки проектных решений при подготовке и проведении буровзрывных и выемочных работ, определять характер сдвижений и деформаций горных пород для оценки устойчивости массивов и их безопасной отработки.

Методы 3D лазерного сканирования позволяют создавать геолого-структурные модели месторождений с полной инфраструктурой горных выработок по горизонтам и очистным блокам с привязкой к геодезическим координатам по GPS-приемникам, реперам и меткам. Развитие и совершенствование геомеханического мониторинга на основе геолого-маркшейдерской документации позволяет формировать 3D модели горных выработок, рудных тел, тектонических нарушений, отображать сейсмические события во времени и пространстве, уточнять развитие трещин и разломов по положению напластований в местах планируемой отработки залежей. С помощью таких моделей геомеханические службы рудников и шахт получают, например, возможность точнее визуализировать сейсмические события в пределах месторождения и, с учетом блочного строения массивов, решать вопросы обеспечения безопасности горных работ.

В настоящее время достаточно остро стоят вопросы осуществления геомеханического мониторинга на опасных по горным ударам горнорудных месторождениях, что предопределяет выбор программных средств в пользу систем, обеспечивающих: хранение и управление большими объемами данных в одном проекте; опрос, моделирование и манипулирование наборами данных сканированных точек поверхностей геообъектов на компьютере; 3D отображение геолого-структурных моделей месторождений с инфраструктурами горных выработок; импорт/экспорт данных в универсальные CAD системы, форматы визуализации и моделирования; возможность визуализации очагов проявлений сейсмических событий во времени и пространстве; создание качественных изображений сканированных поверхностей.

Прикладной характер создания сканированных 3D моделей горных выработок позволяет в полной мере оценивать потенциал освоения залежи. Отработка методов построения сложно-структурных месторождений и тектонических нарушений, формирования элементов различных систем очистной добычи открывает новые возможности при предпроектной проработке и оценке различных вариантов вскрытия, подготовки и отработки месторождений и позволяет, в частности, перевести процесс составления документации в цифровой вид.

Собственно составление горно-геологической модели карьера или рудника не вызывает особых проблем. Для построения объективных моделей необходимо осуществлять совмещение данных 3D лазерного сканирования с оцифрованной геолого-маркшейдерской горно-графической информацией в CAD системах в соответствии с нумерацией, установленной для отрисовки планшетов на горнодобывающих предприятиях. Векторизация баз данных реализуется соответствующими модулями CAD. Фрагменты оцифрованных чертежей уточняются и корректируются по данным лазерного сканирования и с помощью системы Сусlone могут позиционироваться в нужные места поля месторождения.

Как правило, построение геолого-маркшейдерских чертежей достаточно трудоемкая операция, и специалисты должны быть оснащены программными средствами оцифровки топографических поверхностей промышленных площадок карьеров и рудников, что позволит оперативно вносить соответствующие изменения. Выполнение работ по трехмерному проектированию необходимо осуществлять с учетом идеологии, принципами создания моделей горногеологических объектов и интерфейсами применяемых программных средств.

В настоящее время на горнодобывающих предприятиях основная часть работ по промышленному использованию технологий 3D лазерного сканирования в производственный процесс осуществляется маркшейдерскими службами. Очевидные преимущества перевода всех имеющихся горно-графических данных в цифровой вид позволяют значительно облегчить процесс получения исходной информации для планирования и проектирования горных работ. Создание любого вида сечений и разрезов происходит достаточно оперативно в течение короткого времени. Оформление горной графической документации с применением общепринятых условных обозначений и стандартов, использование шаблонов по настройке печати позволяет создавать при необходимости бумажные копии в любом масштабе и виде. Окончательное формирование технологической чертежной документации возможно, например, средствами САDпрограмм, поддерживающими файлы формата DXF.

Возможность получения интегрированной среды моделирования на основе системы Cyclone позволяет, в частности, совмещать в системе I-Site Studio технологии синхронного и параметрического анализа горных геообъектов, определять стационарные состояния и сдвижения, характеризуемых потоками диссипируемой энергии при вариации видов динамических нагрузок и скоростей деформирования породных массивов. Существенным преимуществом цифровых моделей является их высокая математическая точность.

Совокупность систем Cyclone, I-Site Studio и Auto CAD (или Solid Edge ST6 Premium с модулем NX-CAD) и размещение их на соответствующих серверах позволяет реализовать комплексные автоматизированные рабочие места специалистов горнотехнического профиля. В частности, использование системы Cyclone обеспечивает работу с геологическими объектами, которые в Au-

to CAD могут быть представлены векторными, каркасными и блочными моделями и обеспечивают решение геомеханических задач по структуризации массивов в рамках следующих функций: отображение на объемных моделях сканированных горных выработок координат положения скважин и мест взятия геологических проб; визуализацию моделей проб, включая отображение траекторий скважин и их устьев; построение моделей разведочных линий; формирование пластообразных моделей и разрезов геологических тел по выделенным кондиционным интервалам с отображением блочно-иерархического строения.

Система Cyclone обеспечивает ведение баз данных точек маркшейдерского обоснования для открытых и подземных горных работ и на их основе позволяет решать различные задачи: определение координат точки методом прямой и обратной засечек с оценкой точности и визуализации точек маркшейдерского обоснования в пространстве, на разрезах и планах; построение профилей объектов с выводом результатов профилирования на печать; определение объемов полезного ископаемого и вскрышных пород между двумя положениями карьера (выработки рудника); интерактивное дополнение моделей подземных горных выработок на основе векторизованных САD моделей маркшейдерских планшетов; моделирование проходки подземных горных выработок на основе данных лазерного сканирования; нахождение объектов проходки с визуализацией результатов за любой период и формированием списка выработок с метражами и объемами проходки; построение профилей и корректировку формы сечений подземных горных выработок, присвоение признака типа крепления.

Данные по опробованиям в виде связанных таблиц параметров скважин (горных выработок), проб, характеристик полезных ископаемых и инклинометрии могут применяться для формирования модели геологоразведочной сети и решения на ее основе задач по созданию моделей рудных тел, геомеханическому исследованию месторождения, подсчету запасов полезного ископаемого, объемных и качественных показателей выемочных единиц. Дополнение представленных систем вновь создаваемыми программными средствами позволит расширить формирование списков характерных для месторождений разновидностей пород и диапазонов возможных содержаний компонентов полезных ископаемых, ускорять процесс ввода данных с их контролем и систематизацией, предоставляет возможность оперативно решать задачи проектирования и корректировки выработок, планирования и управления горными работами.

САD системы обеспечивают оперативное решение технологических задач при ведении открытых и подземных горных работ. Среди функций, выполняемых в системе: построение бортов карьера с вписыванием транспортных коммуникаций с учетом проектных решений; конструирование насыпей с подсчетом объемов перемещаемой горной массы; построение моделей прирезок и взрывных блоков, построение изолиний, а также подсчет объема и содержания полезного ископаемого в прирезках, блоках и по горизонтам. 3D визуализация позволяет наглядно отобразить текущее и оперативное планирование и его результаты, вести мониторинг технологических процессов. Система позволяет проектировать массовые взрыв на карьерах, позволяет решать специализированные задачи, такие как размещение взрывных скважин в границах взрывного блока, формирование (на основе шаблона) проекта на бурение, корректировка моделей взрывных скважин по данным фактического бурения.

Специалистами ИГД СО РАН на Таштагольском руднике с помощью аппаратуры Leica Scan Station 2 проводилось сканирование бортов и кровли частично заложенной подземной камеры и камеры, из которой осуществлялся выпуск руды [7, 8]. Результаты использованы для уточнения проекта отработки участка залежи, определения структурного строения массива и обоснования выбора крепи в САD системе объемного проектирования.

Таким образом, с развитием 3D лазерных технологий горные работы на карьерах и в рудниках становятся доступными для контроля над их выполнением в любой момент времени для всех служб горнодобывающих предприятий, являясь единой информационной базой для принятия технически обоснованных решений по разработке месторождений полезных ископаемых. Высокие затраты на создание 3D моделей позволяют существенно сократить время на выполнение проектных решений и плановых направлений развития горных работ и обеспечивают возможность принятия наиболее оптимальных инженернотехнических решений с учетом многовариантных проработок и расчетов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов ОН33.1 РАН и ИП-100 СО РАН в 2013-2014 г.г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Просекин Б.А. Цифровые технологии трехмерного моделирования горных работ на Приаргунском горно-химическом объединении // Автоматизация – специалистам горного дела. – 2009. – № 2 (33).

2. Варванович Н.Н. Майнфрэйм – автоматизированное ведение горных работ // Глобус. – 2009. – № 5 (08), С. 36-39.

3. Fekete S., Diederichs M. Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 57 (2013) 11–23.

4. Опарин В.Н. Юшкин В.Ф., Аникин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды. // ФТПРПИ. – 1998. – № 5, С. 16-33.

5. Опарин В.Н., Середович В.А., Юшкин В.Ф., Прокопьева С.А., Иванов А.В. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования. // ФТПРПИ. – 2007. – № 5, С. 102-112.

6. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф., Востриков В.И., Погарский Ю.В., Назаров Л.А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.

7. Юшкин В.Ф., Климко В.К., Чиглинцев В.А., Штирц В.А., Рублев Д.Е. Формирование кровли подземной камеры рудника «Таштагольский» после массового взрыва // Труды XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2013, С. 404-409.

8. Трубецкой К.Н., Опарин В.Н., Чанышев А.И., Шер Е.Н., Юшкин В.Ф. и др. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых / Под ред. К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН. – 2012.

© В. Ф. Юшкин, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Л. Л. Ефименко. Численная схема и ее ре-	
ализация для решения плоских и пространственных статических задач теории	
упругости в постановке Коши	
2. В. Д. Барышников, Д. В. Барышников. Контроль вертикальных сдвижений	
кровли отрабатываемого блока с использованием глубинных реперов	8
3. В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова. Прогнозная оценка деформированного	
состояния массива горных пород при отработке запасов под водоносным ком-	
плексом	13
4. А. Г. Вострецов, Г. И. Кулаков, Г. Е. Яковицкая. Диагностика процесса	
разрушения образцов горных пород в лабораторных экспериментах по энергети-	
ческим характеристикам сигналов электромагнитного излучения	
5. В. И. Востриков, Н. С. Полотнянко. Многоканальный измерительный	
комплекс для контроля обвалоопасных участков бортов карьеров с возможностью	
получения данных в режиме on-line	
6. В. И. Востриков, О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов. Взаимосвязь	
полей макро- и микродеформаций, инфракрасного излучения, микросейсмической	
эмиссии при нагружении геосреды до разрушения. Комплекс для физического	•
моделирования	
7. Л. Н. Гахова. Напряженное состояние конструктивных элементов много-	<u> </u>
слойного сталежелезобетонного водовода в строительный период	
8. Л. И. Генолина, Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев. Численное моделирование	10
виорационного взаимодеиствия упругого рабочего органа с основанием	
9. Б. Б. Данилов, Д. О. Чещин. Спосоо и устроиство для образования криво-	15
линейных скважин методом прокола.	
10. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкии, Д. О. Чещин. Перспективы развития	40
11 Е. В. Панисова А. И. Контрин А. П. Унатични, Систория контроля троок	
11. <i>L. D. Денисови, А. И. Конурин, А. П. Амелинин.</i> Системы контроля траск-	54
12 В Н Ладоносов С Б Ожизина С П Ким Л С Ожизин Обоснование	
12. <i>В. П. Долгоносов, С. В. Ожигини, С. П. Ким, Д. С. Ожигин.</i> Обоснование параметров риутренцего отрада на Шубаркольском угольном разрезе	59
13 Л С Евстигнов А В Савиенко Молепирование прухфазной фильтра-	
нии несмешивающихся жилкостей в пористой гилрофильной среде	64
14 Е К Емельянова А Ю Алексеев А М Шестопалов В А Забелин	
Экологические полхолы к биорекультивации нефтезагрязненных грунтов и воло-	
емов в условиях Сибири	
15. В. П. Ефимов. Исследование зависимости трешиностойкости горных по-	
род от скорости нагружения	74
16. Д. В. Барышников, В. Г. Качальский. К вопросу программной компенса-	
ции температурных воздействий на результаты измерения малых перемещений	
скважинным многоканальным деформометром	79
17. Т. А. Киряева. К вопросу о моделировании термодинамических процес-	
сов в углеметановых пластах	
18. Т. А. Киряева. Исследование состава углеметановых геоматериалов с	
помощью СВЧ-пиролиза каменного угля	

19. С. А. Кондратьев. Влияние поверхностно-активных по отношению	
к границе раздела «газ – жидкость» форм реагента на образование флотацион-	
ного контакта	97
20. И. А. Коновалов, С. А. Кондратьев. Роль поверхностно-активных по от-	
ношению к границе раздела «газ – жидкость» форм ксантогенатов в механизме	
образования флотационного комплекса	
21. А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Х. Г. Нам. Об улуч-	
шении нагрузочной характеристики грунтовых анкеров с гибкой тягой	107
22. Р. А. Кулагин, О. Р. Кулагин, Б. Б. Сиволап. Пресс для брикетирования	
мелкодисперсных и мелкозернистых материалов	
23. Г. И. Кулаков. Эпюры опорного горного давления очистного забоя	117
24. С. Я. Левенсон, Л. И. Гендлина, А. В. Морозов, М. А. Ланцевич. Особен-	
ности процесса уплотнения связного материала в замкнутом объеме	121
25. А. В. Леонтьев. Об особенностях метода измерительного гидроразрыва	107
при контроле напряжений в шахтных условиях	
26. В. Ф. Линейцев, В. И. Щелканова, Г. И. Кулаков. Особенности электро-	100
магнитной эмиссии в зоне подработки земной поверхности Гаштагольского рудника	
27. П. А. Мартынюк, И. В. Колыхалов. Развитие трещин гидроразрыва воли-	107
зи жесткого экрана	13/
28. В. Е. Миренков, А. А. Красновскии. Деформирование олоков пород	1 4 2
	143
29. В. Е. Миренков, А. А. Красновскии. Восстановление условии на контакте	140
при нагружении ооразцов	148
30. Л. А. Назарова, Л. А. Назаров, Н. А. Мирошниченко, М. Д. Джаманоаев.	
исследование процесса тепломассопереноса в ограждающей дамое хвостохрани-	152
лища в зоне многолетнемерзлых пород	
51. <i>М. М. Пемирович-динченко, А. А. Шитския.</i> Моделирование ссисмиче-	150
ского поля в пористои среде, расчет для одиночной поры и для ансамоля пор	137
52. Л. Л. Пургалиев, Л. Г. Либибулии. Оценка внедрения винтовых насосов	164
33 4 4 Нургалиев П Т Хабибуллин Анализ эффективности ОРЭ на мел-	104
ких месторождениях юго-востока республики Татарстан	169
34 В Н Опатин В И Востока республики Татарстан	
нов Комплескное исследование особенностей проявления физических полей пол	
влиянием флюиловазвыва Пабоватовный эксперимент	173
З5 Г А Пак В Н Лолгоносов С Б Ожигина А А Нагибин Анализ газо-	
линамических явлений при проходке горных выработок по угольному пласту	
К-10 восточного крыла шахты «Сокурская»	
Зб. А. В. Панов. А. А. Скулкин. Л. В. Шибизов. Р. И. Родин. Опрелеление	
компонент природного поля напряжения по данным измерительного гидродазрыва	
37. А. В. Патутин. С. В. Сердюков. Метолические решения при определе-	
нии геомеханических свойств горных пород в протяженных пластовых скважинах	
38. А. М. Петреев, А. С. Смолениев. Влияние жесткости адаптера в системе	
«ударная машина – адаптер – погружаемый объект»	
39. А. М. Петреев, А. Ю. Примычкин. Особенность работы кольцевого упруго-	
го клапана круглого сечения в системе воздухораспределения пневмоударных машин	
40. В. И. Ростовцев. Радиационно-термический метод изменения магнит-	
ных свойств минералов в обогащении минерального сырья	
41. Е. В. Рубцова. Стенд трехосного независимого нагружения для физиче-	
ского моделирования процесса измерительного гидроразрыва	

42. Л. А. Рыбалкин, В. В. Сказка, С. В. Сердюков. Разработка технических	
и методических средств скважинного вибрационного воздействия для интенсифи-	
кации дегазации	216
43. А. В. Савченко, Ю. В. Погарский, Е. Н. Чередников. Создание скважин-	
ных дебалансных виброисточников для интенсификации добычи нефти	222
44. В. М. Серяков. О взаимосвязи процесса разрушения подработанной	
толщи с формированием зон трещиноватости горных пород вблизи земной по-	
верхности	225
45. А. А. Скулкин. Разработка новой конструкции скважинного зонда для	
выполнения измерительного гидроразрыва	231
46. Б. Н. Смоляницкий, Е. Д. Тимофеев. Управляемый пневмопробойник	236
47. А. С. Танайно. О классификациях горных пород по прочностным	
свойствам	241
48. А. П. Тапсиев, В. А. Усков. Состояние и перспективы развития мине-	
рально-сырьевой базы заполярного филиала ОАО «ГМК "Норильский никель"»	247
49. В. В. Тимонин, А. С. Кондратенко. Погружной пневмоударник для от-	
крытых горных работ для бурения скважин на высоком давлении сжатого воздуха	251
50. О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов, Б. Б. Сиволап. Зависимость	
деформационно-прочностных характеристик геоматериалов со структурой в ин-	
тервале температур от -20 до +120 °С при различных видах нагружения	256
51. О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов. Зависимость деформационно-	
прочностных характеристик гетерогенных геоматериалов от структуры при раз-	
личных видах нагружения. Механизм эволюции зоны разрушения	261
52. М. Н. Цупов, А. В. Савченко. Физические способы воздействия на уголь-	
ный массив с целью его дегазации	
53. А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко. Критические нагрузки	
в задаче о потере устойчивости крепей цилиндрической формы до и за пределом	
упругости	271
54. А. И. Чанышев. Блочные модели геосред и их анализ	276
55. Е. Н. Шер, В. П. Ефимов. Моделирование развития трещины в горной	
породе, возникающей при ударе клиновидного инструмента	281
56. Е. Н. Шер, А. Г. Черников. Экспериментальное исследование влияния	
сжатия на распространение волн в блочных средах при ударном нагружении	287
57. В. Ф. Юшкин. Методы трехмерного моделирования породных массивов	
при исследованиях геомеханических свойств и ведении горных работ	293

CONTENTS

1. A. I. Chanyshev, I. M. Abdulin, L. L. Efimenko. Numerical scheme and im-	
plementation for 2D and 3D static Cauchy's problems of elasticity	3
2. V. D. Baryshnikov, D. V. Baryshnikov. Monitoring roof substience in extrac-	
tion rock blok using deep-seated plugs	8
3. V. D. Baryshnikov, L. N. Gakhova. Rock mass deformation prediction in min-	
ing under aquifer	13
4. A. G. Vostretsov, G. I. Kulakov, G. E. Yakovitskaya. Lab test diagnostics of	
rock fracture based on electromagnetic radiation energy characteristics	
5. V. I. Vostrikov, N. S. Polotnyanko. Multichannel measuring equipment for	
monitoring rockfall-hazardous areas in open pit mines with on-line data acquisition	25
6. V. I. Vostrikov, O. M. Usoltseva, P. A. Tsoi, V. N. Semenov. Interaction of	
macro- and microdeformation fields, infrared radiation and microseismic emission in	
geomedium under loading until failure. Physical modeling equipment	
7. L. N. Gakhova. Stresses in structural elements of multilayer steel-and-	
concrete water passageway during construction	
8. L. I. Gendlina, E. G. Kulikova, V. M. Usoltsev. Numerical modeling of vibra-	
tion between elastic operating member and the base	
9. B. B. Danilov, D. O. Cheshchin. Method and tool for curved hole making by	
puncturing	45
10. B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky, D. O. Cheshchin. Prospects for directional	
hole drilling technologies in high strength rocks	
11. E. V. Denisova, A. I. Konurin, A. P. Khmelinin. Control systems for rock de-	
struction tool motion trajectory in rock mass	54
12. V. N. Dolgonosov, S. B. Ozhigina, S. P. Kim, D. S. Ozhigin. Justification of	
parameters of the internal dump on Shubarkolsky coal mine	
13. D. S. Evstigneev, A. V. Savchenko. Modeling two-phase immiscible fluid flow	
in porous hydrophilic medium	64
14. E. K. Emelyanova, A. Yu. Alekseev, A. M. Shestopalov, V. A. Zabelin. Ecolo-	
gy-based approaches to bio-remediation of oil-contaminated soil and water in Siberia	70
15. V. P. Efimov. Fracture toughness versus loading rate in rocks	74
16. D. V. Barishnikov, V. G. Kachalsky. For questions software temperature com-	
pensation of the result of the measurement of small displacements wells multichannel	
deformometer	
17. T. A. Kiryaeva. Modeling thermodynamic processes in methane-bearing coal	
18. T. A. Kiryaeva. Analysis of coal-and-methane geomaterial composition using	
microwave-assisted pyrolysis of black coal	
19. S. A. Kondratiev. Influence exerted on particle – bubble attachment by forms	
of reagents surface-active relative to liquid/air interface	
20. I. A. Konovalov, S. A. Kondratiev. Role of air/liquid interface active forms of	100
xanthate in the mechanism of particle – bubble attachment	102
21. A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan. On improve-	107
ment of load-displacement diagram of ground anchors with flexible tendon	10/
22. K. A. Kulagin, U. K. Kulagin, B. B. Sivolap. Press for briquetting fine-	110
aispersed and fine-grain	112
25. G. I. KUIAKOV. Lines of abutment pressure from workface	11/

24. S. Ya. Levenson, L. I. Gendlina, A. V. Morozov, M. A. Lantsevich. Features of	
coherent material compaction in closed space	121
25. A.V. Leontiev. Features of hydraulic fracturing for stress measurement and	
control in mines	127
26. V. F. Lineitsev, V. I. Shchelkanova, G. I. Kulakov. Electromagnetic emission	
in the zone of ground surface undermined by the Tashtagol mine	133
27. P. A. Martynyuk, I. V. Kolykhalov. Hydraulic fracturing at rigid shield	137
28. V. E. Mirenkov, A. A. Krasnovsky. Deformation of rock blocks with crack	143
29. V. E. Mirenkov, A. A. Krasnovsky. Recovery of contact conditions in speci-	
men under loading.	148
30. L. A. Nazarova, L. A. Nazarov, N. A. Miroshnichenko, M. D. Jamanbaev.	
Heat and mass transfer in the tailings dam in the permafrost zone	153
31. M. M. Nemirovich-Danchenko, A. A. Shatskava, Modelling of the seismic	
field in the porous environment: calculation for the single time and for ensemble of the time	
32. A. A. Nurgaliev. L. T. Khabibullin. Assessment of positive displacement	
screw pumps in the system of field gathering and transportation of oil	164
33 A A Nurgaliev I. T Khabibullin Analysis of simultaneous-separate opera-	
tion efficiency at small reservoirs in the south-east Tatarstan	169
34 V N Oparin V I Vostrikov O M Usoltseva P A Tsoi V N Semenov In-	
tegrated analysis of characteristics of physical fields under effect of fluid fracturing la-	
borstory experiment	173
35 G A Pak V N Dolaonosov S B Ozhiging A Nagihin The analysis of	175
the geodynamic phonomena at the driving of the openings in K 10 coal layer of the cost	
wing of "Solarskava" mino	170
26 A. V. Danoy, A. A. Skulkin, I. V. Taibirov, P. I. Podin, Determination of netu	179
50. A. V. FUNOV, A. A. SKUIKIN, L. V. ISIOIZOV, K. I. KOUIN. Determination of natu-	186
27 A. V. Patutin, S. V. Sardyukov, Methodological solutions for geomechanical	160
<i>sroportion determination of rocks in long in soom wells</i>	101
28 A M Detreeu A C Smelentary Effect of edenter stiffness in the neroussion	191
so. A. M. Felleev, A. S. Smolenisev. Effect of adapter suffices in the percussion	106
20 A. M. Detreen A. V., Drinnshlin, Specificity of exercision of round election	190
39. A M. Petreev, A Tu. Primychkin. Specificity of operation of round elastic	201
40 V L Destautage Dediction high temperature method of modifying magnetic	
40. V. I. Rostovisev. Radiation-nigh temperature method of modifying magnetic	200
Al E V D lieur Three spielindenen deut het die eine heurt fen abereisel werdeling	200
41. E. V. Rubtsova. Inree-axial independent loading bench for physical modeling	011
of nydraulic fracturing for stress measurement	
42. L. A. Rybaikin, V. V. Skazka, S. V. Serayukov. Equipment and procedures of	016
downhole vibration stimulation of gas drainage	
43. A. V. Savchenko, Yu. V. Pogarsky, E. N. Cherednikov. Downhole imbalance	222
vibration sources for oil recovery stimulation	
44. V. M. Seryakov. Interaction between undermined rock mass failure and for-	~~~
mation of fractured zones near the earth surface	
45. A. A. Skulkin. New design of downhole device for hydraulic fracturing for	• • •
stress measurement	231
46. B. N. Smolyanitsky, E. D. Timofeev. Controllable pnevmohammer drill	236
4/. A. S. Tanaino. Classification of rock material based on strength	241
48. A. P. Tapsiev, V. A. Uskov. Mineral and raw materials supply of the transpo-	• ·
lar division Norilsk Nickel: state-of-the-art and prospects	247
49. V. V. Timonin, A. S. Kondratenko. Downhole high pressure air hammers for	
open pit mining	251

50. O. M. Usoltseva, P. A. Tsoi, V. N. Semenov, B. B. Sivolap. Change of defor-	
mation and strength characteristics of structured geomaterials in the temperature range	
from -20 to +120 °C under different-type loading	
51. O. M. Usoltseva, P. A. Tsoi, V. N. Semenov. Deformation and strength charac-	
teristics versus structure of heterogeneous materials under various-type loading. Mecha-	
nism of failure zone evolution	
52. M. N. Tsupov, A. V. Savchenko. Physical stimulus methods for coal degassing	
53. A. I. Chanyshev, O. E. Belousova, O. A. Lukyashko. Critical loads in the prob-	
lem on instability of cylindrical support in pre- and post-limit of elasticity	
54. A. I. Chanyshev. Analysis of block models of geomedia	
55. E. N. Sher, V. P. Efimov. Modeling growth of fracture in rocks under wedge	
impact loads	
56. E. N. Sher, A. G. Chernikov. Experimental study of the influence of compres-	
sion on propagation of waves in block structure media under impact loading	
57. V. F. Yushkin. 3D modeling techniques in studying geomechanical properties	
of rock masses under mining	

Научное издание

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

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

T. 3

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка Л. Н. Шиловой

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997. Подписано в печать 08.04.2015. Формат 60 × 84 1/16 Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,67. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ 630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ 630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.