

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

# ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

194  
года

Издается с 1825 года  
(№ 2267)

10.2019

ВИОГЕМ

ОАО «ВИОГЕМ» — 60 лет  
(с. 5-24)

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

ОАО «ВИОГЕМ»

**Серый С. С., Яницкий Е. Б.** Центр решения горных проблем . . . 5

**Сергеев С. В., Зинченко А. В., Лепетюха Д. С.**  
Особенности деформирования крепи выработок сопряжения на больших глубинах . . . . . 8

**Игнатенко И. М., Яницкий Е. Б., Дунаев В. А., Кабелко С. Г.** Трещиноватость породного массива в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» . . . . . 11

**Титов В. И., Забусов Н. И., Рязжских М. В., Лукьяненко Н. А.** Изучение гидрогеологической обстановки для выработки проектных решений по снижению обводненности бортов карьеров . . . . . 15

**Воронин А. А., Волков Ю. И., Жданова Т. В., Вершинина О. О.** Обоснование и разработка современных способов защиты горных выработок от подземных вод . . . . . 18

**Агарков Н. Б., Еремица В. Г., Маликов А. М., Шконда В. Н.** Научно-технические исследования и проектирование систем осушения . . . . . 22

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ИМЕНИ Н. А. ЧИНАКАЛА СО РАН

**Еременко А. А., Шапошник Ю. Н., Филиппов В. Н., Конуриин А. И.** Развитие научных основ безопасной и эффективной геотехнологии при освоении удароопасных месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера . . . . . 33

**Востриков В. И., Полотнянко Н. С., Трофимов А. С., Потака А. А.** Мониторинг геомеханического состояния массивов горных пород на глубоких карьерах . . . . . 39

**Ревуженко А. Ф.** Некоторые задачи механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред в горном деле . . . . . 43

**Щукин С. А., Неверов С. А., Неверов А. А., Конуриин А. И.** Влияние способа подготовки залежи на безопасность доработки междукammerных и междуэтажных целиков маломощных рудных тел . . . . . 50

**Городилов Л. В.** Теория, методы и программы расчета гидроударных систем, совершенствование их конструкции . . . 55

**Красюк А. М., Русский Е. Ю., Попов Н. А.** Новые направления в создании шахтных осевых вентиляторов главного проветривания . . . . . 61

## ГЕОЛОГИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Игнатов П. А., Колесник А. Ю., Толстов А. В., Мальцев М. В.** Геологические признаки рудовмещающих структур Слюдякарского кимберлитового поля Якутии . . . . . 67

## СЫРЬЕВАЯ БАЗА

**Худякова Л. И., Кислов Е. В., Войлошников О. В.** Основные породы рудоносных ультрамафит-мафитовых комплексов и их практическое использование . . . . . 25

## ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

**Назарова З. М., Косьянов В. А., Леонидова Ю. А.** Риски при разработке месторождений полезных ископаемых на условиях концессии . . . . . 72

**Лисов В. И., Брюховецкий О. С., Бобылов Ю. А., Лунькин А. Н.** Инновационные аспекты формирования новых интегрированных структур в горном бизнесе России . . . . . 77

## РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Лукичев С. В., Онуприенко В. С., Семенова И. Э., Белгородцев О. В.** Увеличение производственной мощности подземного рудника при освоении запасов глубоких горизонтов . . . . . 85

## ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

**Черепанский М. М., Шишляев В. В.** Моделирование эффектов изменения проницаемости угольных пластов при активных процессах десорбции метана и фильтрации пластового флюида . . . . . 89

## ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**Зеньков И. В., Вокин В. Н., Кирюшина Е. В., Морин А. С.** Формирование экосистемы на территории отработанных железорудных месторождений в Красноярском крае . . . . . 93

## ЮБИЛЕИ

К юбилею Гагут Луизы Дмитриевны . . . . . 30

Титиевскому Ефиму Марковичу – 90 лет . . . . . 31

Яковлеву Виктору Леонтьевичу – 85 лет . . . . . 31

Чижкину Евгению Федоровичу – 80 лет . . . . . 71

## ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Чекушина Т. В.** Международная конференция «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке» (Плаксинские чтения–2019) . . . . . 99

## РЕКЛАМА

На обложке:

АО «Машиностроительный холдинг»  
«Уголь России и Майнинг-2020» –  
Международная специализированная выставка

На цветной вкладке:

ООО «БелТрансЛогистик»  
**Насковец А. М.** Карьерная линейка самосвалов  
БЕЛАЗ грузоподъемностью 90 тонн

MONTHLY SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

The basic edition of the Intergovernmental council of CIS countries in exploration, usage and protection of the earth bowels

With participation of “ALROSA” PJSC, “Apatit” JSC, PJSC “MMC “NORILSK NICKEL”, “Mekhanobr-Technica” JSC

With assistance of IPKON RAN, Ural State Mining University, State enterprise Navoi mining and metallurgical works, “Gornopromyshlenniki Rossii” non-commercial partnership, State Hermitage Museum

Information coordinator of expansion of strategic mineral supply for the Russian Federation National Nuclear Corporation Rosatom is ARMZ Uranium Holding (Atomredmetzoloto)

Founders: “Ore & Metals” Publishing house, National University of Science and Technology “MISIS”, Autonomous Noncommercial Organization “TV News Channel “Khibiny TV”

The journal has been published since 1825 at Mining military school

Publisher: “Ore & Metals” publishing house  
Phone/fax: +7 (495) 638-45-18  
E-mail: rim@rudmet.com

Chairman of the managing board: Leonid Vaisberg

Editor-in-Chief: Lev Puchkov

Deputy Editor-in-Chief: Alexander Vorobiev

Mining consultant: Sergey Il'yin

Leading editor: Lyudmila Kostina

Editor: Vera Elistratova

Advertising manager: Natalia Kolykhalova

Responsible for pre-printing work: Daria Vorobyeva

Actual address: Moscow, Leninsky prospekt 6 bld. 2, office 619

Mailing address: Russia, 119049, Moscow, P.O. Box # 71

Phone/fax: +7 (499) 236-10-62, +7 (499) 236-11-86

E-mail: gornjournal@rudmet.com

Internet: www.rudmet.com

Printed in Buki Vedi, LLC

CONTENTS

FROM THE OPERATIONAL EXPERIENCE OF THE MINING COMPANIES AND THE ORGANIZATIONS

VIQEM

**Seryi S. S., Yanitsky E. B.** Center for problem solution in mining 5

**Sergeev S. V., Zinchenko A. V., Lepetyukha D. S.** Features of roof support deformation at intersections in deep mines . . . . 8

**Ignatenko I. M., Yanitsky E. B., Dunaev V. A., Kabelko S. G.** Jointing of rock mass in open pit at the Zhelezny mine of the Kovdor Mining and Processing Plant . . . . . 11

**Titov V. I., Zabusov N. I., Ryazhskikh M. V., Lukyanenko N. A.** Analysis of hydrogeological conditions for making design choices on water content reduction in pit walls . . . . . 15

**Voronin A. A., Volkov Yu. I., Zhdanova T. V., Vershinina O. O.** Development and justification of modern methods to protect mine opening from groundwater . . . . . 18

**Agarkov N. B., Eremitsa V. G., Malikov A. M., Shkonda V. N.** Scientific-and-technological research and designing of dehydrating systems . . . . . 22

N. A. CHINAKAL INSTITUTE OF MINING SIBERIAN BRANCH RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**Eremenko A. A., Shaposhnik Yu. N., Filippov V. N., Konurin A. I.** Development of scientific framework for safe and efficient geotechnology for rockburst-hazardous mineral deposits in Western Siberia and the Far North . . . . . 33

**Vostrikov V. I., Polotnyanko N. S., Trofimov A. S., Potaka A. A.** Geomechanical monitoring in deep open pit mines . . 39

**Revuzhenko A. F.** Some problems of mechanics of deformable solid and granular media in mining . . . . . 43

**Shchukin S. A., Neverov S. A., Neverov A. A., Konurin A. I.** Influence of preparation method on extraction of rib and floor pillars in mining thin ore bodies . . . . . 50

**Gorodilov L. V.** Design theory, methods, programs and development for hydraulic percussion systems . . . . . 55

**Krasyuk A. M., Russky E. Yu., Popov N. A.** New trends in design of axial fans for main ventilation in mines . . . . . 61

GEOLOGY OF MINERALS

**Ignatov P. A., Kolesnik A. Yu., Tolstov A. V., Maltsev M. V.** Geological signs of ore-hosting structures in the Syuldyukar kimberlite field in Yakutia . . . . . 67

RAW MATERIAL BASE

**Khudyakova L. I., Kislov E. V., Voyloshnikov O. V.** Basic rocks in ore-bearing mafic-ultramafic complexes and their use in practice . . . . . 25

ECONOMY, ORGANIZATION AND MANAGEMENT

**Nazarova Z. M., Kosyanov V. A., Leonidova Yu. A.** Risks in mineral mining on a concession basis . . . . . 72

**Lisov V. I., Bryukhovetskiy O. S., Bobylov Yu. A., Lunkin A. N.** Innovations in formation of new integrated structures in the mining business in Russia . . . . . 77

DEVELOPMENT OF DEPOSITS

**Lukichev S. V., Onuprienko V. S., Semenova I. E., Belogorodtsev O. V.** Increasing production capacity of an underground mine at deep levels . . . . . 85

INDUSTRY SAFETY AND LABOUR PROTECTION

**Cherepanskiy M. M., Shishlyaev V. V.** Modeling permeability variation in coal seams during active desorption of methane and flow of formation fluid . . . . . 89

ENVIRONMENTAL PROTECTION

**Zenkov I. V., Vokin V. N., Kiryushina E. V., Morin A. S.** Building the ecosystem on the mined-out land in the Krasnoyarsk Territory . . . . . 93

УДК 622.279.32

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ АКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ ДЕСОРБЦИИ МЕТАНА И ФИЛЬТРАЦИИ ПЛАСТОВОГО ФЛЮИДА

**М. М. ЧЕРЕПАНСКИЙ**<sup>1</sup>, зав. кафедрой, д-р геол.-минерал. наук, vodamch@mail.ru

**В. В. ШИШЛЯЕВ**<sup>2</sup>, начальник отдела

<sup>1</sup>Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский филиал ООО «Газпром проектирование», Москва, Россия

## Введение

Важным свойством угольных пластов как коллекторов природного газа, определяющим возможность его извлечения, является проницаемость системы естественных трещин [1, 2]. Проницаемость углей в природных условиях зависит от макроструктуры угля, степени и характера заполнения фильтрующего объема природной влагой и особенностей проявления горного давления. Предпочтительным методом получения необходимой информации для определения фильтрационных характеристик угольных пластов являются гидродинамические исследования скважин, которые включают: методы пробных и опытных откачек воды из скважин, нагнетание жидкости в пласт с последующей регистрацией кривой падения давления [3], исследование угольных пластов с помощью испытателей пластов на трубах.

В работах [4, 5] авторами представлены результаты численного моделирования по анализу влияния фильтрационных свойств на динамику работы скважин при извлечении метана из угольных пластов при условии сохранения постоянной абсолютной проницаемости эксплуатационных объектов на протяжении периода отбора флюидов. Необходимо отметить, что результаты моделирования не учитывают сложных динамических процессов, происходящих в системе «скважина – пласт» на протяжении всего цикла действия скважины, которые зависят как от физических свойств пластов, так и от технологических операций, выполняемых в скважине, что в дальнейшем приводит к серьезным проблемам при прогнозировании притоков пластового флюида, адаптации гидродинамических моделей, оценке запасов и оптимизации процессов разработки метаногольных месторождений.

## Теория вопроса

Структура угольного пласта со сложными системами эндогенных и экзогенных трещин такова, что его проницаемость чувствительна к изменению напряжений, которые определяются исходным горным давлением и соответствующим ему деформированным состоянием. Серия лабораторных измерений продемонстрировала, что угольные пласты обладают фильтрующей и десорбционной способностью, реагирующей даже на незначительные изменения природного напряженно-деформированного состояния.

В работах зарубежных исследователей [6–9] рассмотрены эксперименты на образцах керна по изучению влияния десорбции метана с поверхности матрицы угля и его диффузии в каналы

Продемонстрированы физические модели, учитывающие эффекты усадки матрицы угля и влияния изменения эффективных напряжений на процесс газоотдачи угольных пластов при активной десорбции метана и фильтрации пластового флюида.

**Ключевые слова:** метаногольное месторождение, угольный пласт, проницаемость, усадка матрицы, фильтрация пластового флюида, моделирование.

**DOI:** 10.17580/gzh.2019.10.13

трещинного пространства на процесс изменение проницаемости угля. Результаты этих испытаний показали, что при снижении давления в образцах керна ниже критического давления десорбции создается условие фазового перехода метана из сорбированного состояния в свободное, и в ходе усадки матрицы вещества угля за счет развития микротрещиноватости проницаемость порово-трещинного пространства начинает возрастать. Одновременно при снижении порового давления происходит увеличение эффективного напряжения, в результате упругое противодействие пласта вышележащему породному массиву уменьшается, что приводит к уменьшению объема порово-трещинного пространства угольного пласта и снижению проницаемости. Эти два взаимосвязанных процесса имеют разную физическую природу и оказывают противоположное воздействие на изменения проницаемости пластов в противоположных направлениях (рис. 1).

## Расчетные модели и методика исследований

Сейдл и Хьюитт, одни из первых исследователей этой области, предложили физическую модель, описывающую изменение коэффициента проницаемости угля в процессе отбора флюида из угольных пластов, которая охватывает физические процессы усадки матрицы угля [10].

Модель построена на предположении, что отношение текущей проницаемости  $k$  к начальной  $k_0$  в результате всестороннего сжатия прямо пропорциональна кубу отношения текущей пористости  $\varphi$  к начальной пористости  $\varphi_0$ :

$$k/k_0 = (\varphi/\varphi_0)^3. \quad (1)$$

Согласно этой теории, упругое изменение коэффициента проницаемости пласта на различных этапах эксплуатации скважин в математической форме может быть представлено уравнением вида

$$\frac{k}{k_0} = \left[ 1 + \left( 1 + \frac{2}{\varphi_0} \right) C_m V_L \left( \frac{p_0}{\rho_L + p_0} - \frac{p}{\rho_L + p} \right) \right]^3; \quad (2)$$

$$C_m = \frac{\varepsilon + c_p p}{V_L \frac{p}{\rho_L + p}}, \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  – начальная пористость порово-трещинного пространства, доли ед.;  $C_m$  – коэффициент раскрытия матрицы, т/м<sup>3</sup>;  $V_L$  – объем Ленгмюра, м<sup>3</sup>/т;  $p_0$  – начальное пластовое давление, МПа;

$p_L$  – давление Ленгмюра, МПа;  $p$  – текущее пластовое давление, МПа;  $\varepsilon$  – относительная деформация, показывающая связь между напряжением и усадкой матрицы;  $c_p$  – сжимаемость матрицы вещества угля, 1/МПа.

Палмер и Мансури в работе [11] предложили другую модель изменения проницаемости в процессе эксплуатации метаноугольных залежей, полученную на основе уравнений теории упругости в пористых средах при условии одноосной деформации и постоянного вертикального напряжения при условии, что средний объем пор, пропорциональный раскрытию микротрещин, пропорционален также кубу коэффициента проницаемости [12]

$$\frac{k}{k_0} = \left[ 1 + \tilde{c}_m \frac{(p-p_0)}{\Phi_0} + \frac{\varepsilon_L}{\Phi_0} \left( \frac{K}{M} - 1 \right) \left( \frac{p}{p_L+p} - \frac{p_0}{p_L+p_0} \right) \right]^3, \quad (4)$$

$$\tilde{c}_m = 1/M - (K/M + f - 1)\gamma, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_L$  – предельный коэффициент объемной деформации Ленгмюра;  $K$  – модуль объемной упругости, МПа;  $M$  – компрессионный модуль деформации, МПа;  $f$  – интерполяционный коэффициент, доли ед.;  $\gamma$  – сжимаемость вещества угля, 1/МПа; остальные обозначения – см. формулу (3).

Модуль объемной упругости  $K$  определяет изменение объема при заданном равномерном сдавливании. Выраженная через модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  величина  $K$  записывается в виде

$$K = E/(3-6\nu). \quad (6)$$

Компрессионный модуль деформации записывается уравнением вида

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (7)$$

Тогда уравнения (4) и (5) с учетом формул (6) и (7) через модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  можно переписать в виде

$$\frac{k}{k_0} = \left[ 1 + \tilde{c}_m \frac{(p-p_0)}{\Phi_0} + \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_L}{\Phi_0} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} - 3 \right) \left( \frac{p}{p_L+p} - \frac{p_0}{p_L+p_0} \right) \right]^3; \quad (8)$$

$$\tilde{c}_m = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} - \left[ \frac{(1+\nu)}{3(1-\nu)} + f - 1 \right] \gamma. \quad (9)$$

В отличие от модели Сейдла – Хьюитта, в модель Пальмера – Мансури введены модули упругости, характерные для деформаций пористых сред, что позволяет описывать не только процессы усадки матрицы вещества угля, но и снижение проницаемости пласта в условиях изотермического сжатия угольных пластов при снижении пластового давления.

Обычно упругие константы модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  допускается определять как постоянные в течение срока добычи флюида из пласта, хотя их значения изменяются в процессе эксплуатации пласта и являются чувствительными к снижению пластового давления в массиве. Коэффициент Пуассона для угольных пластов изменяется в диапазоне от 0,2 до 0,5, что сопоставимо с углеводородными породами. Результаты зарубежных исследований также показывают, что модуль Юнга угля возрастает с увеличением зольности. Кроме того, в угольных пластах наблюдается существенная анизотропия упругости: в направлении параллельно плоскостям напластования модуль Юнга в 1,2–1,4 раза выше, чем поперек слоистости.

Исходными данными для расчета динамических характеристик, как правило, служат скорости продольной и поперечной



Рис. 1. График изменения проницаемости, связанный с раскрытием системы трещин и усадкой матрицы вещества угля

волн, а также плотность пород [13]. Эти параметры среды связаны с упругими свойствами следующим образом.

Динамический модуль Юнга рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность угольных пород, кг/м³;  $V_p$ ,  $V_s$  – скорости продольной и поперечной волн соответственно, м/с.

Коэффициент Пуассона можно определить по формуле

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}. \quad (11)$$

Скорости  $V_p$  и  $V_s$  получают по результатам проведения в скважине широкополосного акустического каротажа. Ввиду малых скоростей распространения упругих волн в разрезах метаноугольных скважин зарегистрировать поперечные волны обычными зондами не представляется возможным. Для этих целей применяют приборы с кроссдипольными источниками упругих колебаний с частотой излучателей, не превышающей 2 кГц.

Плотность угольных пород, определяемая геофизическими методами в метаноугольных скважинах, обычно соответствует плотности насыщенных водой пород (объемной плотности). Последнюю в естественном залегании определяют плотностным гамма-гамма-каротажем.

Для наиболее отчетливого выделения пластов пород с минимальной разностью плотностей и влиянием скважины следует выбирать зонды больших размеров и соответственно увеличивать мощность источника гамма-излучения. Наоборот, для выделения в разрезе наиболее тонких пластов следует использовать зонды малых размеров и использовать источник гамма-излучения небольшой мощности. Указанные требования нельзя удовлетворить одновременно при исследованиях на одной скважине. Поэтому выбирают компромисс, удовлетворяющий одновременно обоим требованиям. В результате экспериментальных работ на угольных месторождениях выбран зонд 0,2 м и источник гамма-излучения – цезий-137 мощностью 2,5 мг экв. радия. Такой зонд позволяет выделять в разрезе пласты или пачки пластов толщиной от 0,1 м при разности в плотностях 0,05 г/см³.

Достоинством определения модулей упругости по данным каротажа является непрерывность профиля этих параметров по глубине и высокая разрешающая способность по вертикали.

Одна из моделей, в которой используется экспоненциальная зависимость между коэффициентом проницаемости и

изменением эффективного напряжения для изотропных линейных упругих пористых сред, была представлена в работах Ши и Дурукана [14, 15]:

$$k/k_0 = \exp[-3c_f(\sigma - \sigma_0)], \quad (12)$$

где  $c_f$  – объемная сжимаемость породы, 1/МПа;  $\sigma$  – действующее напряжение, МПа;  $\sigma_0$  – начальное напряжение, МПа.

В процессе отбора пластовой жидкости, когда пластовое давление выше давления начала десорбции  $p_c$ , изменение эффективного напряжения представляется уравнением

$$\sigma - \sigma_0 = -v(p - p_0)/(1 - v), \quad p_c < p \leq p_0. \quad (13)$$

После вызова двухфазового потока при пластовом давлении ниже давления начала десорбции  $p_c$  изменение эффективного напряжения представляется уравнением

$$\sigma - \sigma_0 = -\frac{v(p - p_0)}{1 - v} + \frac{\epsilon_f E}{3(1 - v)} \left( \frac{p}{p_L + p} - \frac{p_0}{p_L + p_0} \right), \quad 0 < p \leq p_c, \quad (14)$$

где  $\epsilon_f$  – предельная деформация, возникающая при снижении давления; остальные обозначения – см. формулы (3) и (6).

Эта модель предполагает одноосное растяжение и вертикальное стрессовое сжатие.

### Полученные результаты

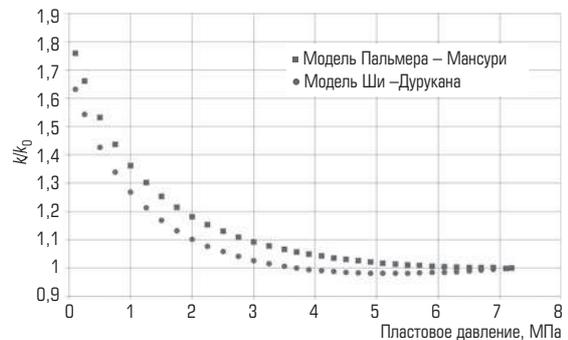
Для оценки влияния проницаемости пласта на добычные возможности скважин в процессе отбора пластового флюида из угольных пластов в условиях Нарыкско-Осташкинского метаногольного месторождения с применением представленных типов моделей Пальмера – Мансури и Ши – Дурукана разработана упрощенная численная фильтрационная модель, где трещиновато-пористая среда ограничена по вертикали плоскопараллельными горизонтальными подошвой и кровлей, процессы фильтрации и объемных деформаций изотермические, трещиновато-пористая среда однородна с постоянными свойствами флюидов. В качестве исходной геологической информации использованы геолого-промысловые и физико-механические свойства угольных пластов: гипсометрическое положение пластов, распределения пористости, проницаемости, начальной метаносности, начальных пластовых давлений из геолого-структурной модели Нарыкско-Осташкинского метаногольного месторождения. Основные геолого-промысловые параметры угольных пластов для этого месторождения (см. таблицу) получены по результатам керногазового опробования и геофизических исследований скважин; все эти параметры участвуют в уравнениях для определения характера деформации угольного пласта при изменении напряжений и усадки матрицы, обусловленной десорбцией газа.

**Рисунок 2** иллюстрирует роль напряжений на изменение проницаемости угольного пласта; последняя вычисляется как функция пластового давления, вызванная усадкой матрицы вещества угля.

Результаты проведенного моделирования показывают, что в горно-геологических условиях Нарыкско-Осташкинского метаногольного месторождения процессы диффузии метана оказывают наиболее существенное влияние на изменение проницаемости пласта в сторону ее увеличения. При этом значения проницаемости увеличиваются практически в два раза при максимальных депрессиях на пласт, что показывает, что после вывода скважины на технологической режим эксплуатации изменение добычи метана из угольных пластов нужно осуществлять без последующего увеличения давления газа в скважине.

### Геолого-промысловые свойства угольных пластов, используемые при моделировании

| Геолого-промысловый параметр                            | Значение            | Тип модели         |               |
|---|---------------------|--------------------|---------------|
|   |                     | Пальмера – Мансури | Ши – Дурукана |
| Начальная пористость $\phi_0$ , доли ед.                | 0,01                | ×                  |               |
| Давление Ленгмюра $p_L$ , МПа                           | 2,12                | ×                  | ×             |
| Объем Ленгмюра $V_L$ , м <sup>3</sup> /т                | 25,6                |                    |               |
| Начальное пластовое давление $p_0$ , МПа                | 7,2                 | ×                  | ×             |
| Коэффициент Пуассона $\nu$                              | 0,35                | ×                  | ×             |
| Модуль Юнга $E$ , МПа                                   | 3520                | ×                  | ×             |
| Предельный коэффициент объемной деформации $\epsilon_L$ | 0,0128              | ×                  | ×             |
| Сжимаемость вещества угля $\gamma$ , 1/МПа              | $1,2 \cdot 10^{-4}$ | ×                  |               |
| Интерполяционный коэффициент $f$                        | 0,5                 | ×                  |               |
| Объемная сжимаемость породы $c_f$ , 1/МПа               | 0,0145              |                    | ×             |



**Рис. 2.** График изменения проницаемости пласта в условиях Нарыкско-Осташкинского метаногольного месторождения

Существенным недостатком использования выше описанных моделей является невозможность учитывать процессы коагуляции пластов мелкодисперсным угольным шламом, интенсивно возникающие на стадии освоения метаногольных скважин.

### Заключение

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что очень важно при реализации проектов добычи метана из угольных пластов уметь не только определять фильтрационно-емкостные свойства угольных пластов в зависимости от горно-геологических условий их залегания при начальных условиях, но и прогнозировать их изменение в процессе эксплуатации скважин.

Для реализации математических моделей, описывающих изменение фильтрационных свойств угольных пластов при активных процессах десорбции метана и фильтрации пластового флюида, требуется привлечение дополнительной информации о физико-механических свойствах угольных пластов, что заставляет применять комплексы волнового акустического широкополосного каротажа с кроссдипольными источниками колебаний.

Теоретические зависимости для определения характера деформации угольного пласта при изменении эффективных напряжений и усадки могут иметь большое практическое

значение, поскольку они позволяют связать хорошо изученные постоянные с более сложными геолого-промысловыми параметрами угольных пластов. Описанные в этой работе приемы могут быть использованы для решения других важных задач, связанных с углублением представлений о физических свойствах

угольных коллекторов в пластовых условиях. Например, для калибровки начального коэффициента трещинной пористости, полученного по результатам лабораторных исследований керна с данными плотностного и широкополосного акустического каротажа.

**Библиографический список**

1. Кирилченко А. В., Хрюкин В. Т., Швачко Е. В. Методологические подходы к подсчету запасов метана в угольных пластах как нетрадиционных коллекторах // Недропользование-XXI век. 2015. № 2(52). С. 92–95.
2. Панина Л. В., Зайцев В. А., Михайлов В. О. Новейшее строение и развитие Нарыкско-Осташкинской площади (Южный Кузбасс) // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. 2015. № 1. С. 20–26.
3. Васильев А. Н., Шишляев В. В., Кирилченко А. В. Внедрение ударно-вращательного способа бурения и эффективных методов геолого-промысловых исследований при разведке метанугольных месторождений // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 45–49.
4. Шарипов Б. И., Сизиков Д. А., Шишляев В. В., Кузнецов Р. В. Анализ применимости различных систем разработки метанугольных залежей в горно-геологических условиях Нарыкско-Осташкинского метанугольного месторождения // Наука и техника в газовой промышленности. 2016. № 4(68). С. 3–9.
5. Сторонский А. Н. Фильтрационно-емкостные свойства угольных пластов // Газовая промышленность. 2012. Спец. выпуск № 1(672). С. 25–27.
6. Lei Yang. A Mixed Element Method for the Desorption-Diffusion-Seepage Model of Gas Flow in Deformable Coalbed Methane Reservoirs // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014.
7. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia, Chunliang Wang, Xihui Chen. Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture // Adsorption. 2016. Vol. 22. Iss. 3. P. 315–325.
8. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shouqing Lu, Kan Jin. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. P. 245–251.
9. Ruimin Feng, Harplani S., Pandey R. Laboratory measurement of stress-dependent coal permeability using pulse-decay technique and flow modeling with gas depletion // Fuel. 2016. Vol. 177. P. 76–86.
10. Seidle J. P., Huitt L. G. Experimental Measurement of Coal Matrix Shrinkage Due to Gas Desorption and Implications for Cleat Permeability Increases // International Meeting on Petroleum Engineering. – Beijing, 1995.
11. Palmer I., Mansoori J. How Permeability Depends on Stress and Pore Pressure in Coalbeds: A New Model // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, 1996. P. 539–544.
12. Хайдина М. П. Нетрадиционные углеводородные ресурсы. Метанугольные месторождения : учеб. пособие. – М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2015. – 101 с.
13. Thakur P. Advanced Reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane. – Cambridge : Gulf Professional Publishing, 2017. – 224 p.
14. Shi J. Q., Duracan S. Drawdown Induced Changes in Permeability of Coalbeds: A New Interpretation of the Reservoir Response to Primary Recovery // Transport in Porous Media. 2004. Vol. 56. Iss. 1. P. 1–16.
15. Ji-Qun Shi, Sevket Duracan. Modelling laboratory horizontal stress and coal permeability data using S&D permeability model // International Journal of Coal Geology. 2014. Vol. 131. P. 172–176. 

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 10, pp. 89–92  
DOI: 10.17580/gzh.2019.10.13

**Modeling permeability variation in coal seams during active desorption of methane and flow of formation fluid**

**Information about authors**

**M. M. Cherepansky**<sup>1</sup>, Head of Chair, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, vodamch@mail.ru  
**V. V. Shishlyayev**<sup>2</sup>, Head of Department

<sup>1</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Division, Gazprom Project Engineering, Moscow, Russia

**Abstract**

In the recent two decades, the methane-bearing coal mines worldwide increasingly often raise a point on the change in the stress state of coal seams during recovery of formation fluids, as well as on the influence of field-geological factors on productivity of holes drilled in methane-bearing coal. Permeability is one of the most variable characteristics of coal seams. Its variation with area, due to rock pressure, deformation characteristics of coal, metamorphic grade and faulting, is an extremely complex pattern which conditions different behavior of drainage zones around a hole. The variation in permeability of coal seams in the course of drilling and operation of methane drainage holes is one of the scantily understood physical processes and, is, thus, of higher concern. This article describes physical models including phenomena of coal matrix shrinkage as well as influence exerted by change in the effective stress on the process of gas recovery from coal during active methane desorption and flow of the formation fluid. The modeling results show that in geological conditions of the Naryk-Ostashkin methane-bearing coal field, methane diffusion has the highest effect on the coal permeability by increasing it. Implementation of mathematical models of change in coal permeability during active processes of methane desorption and fluid flow requires additional information of physical and mechanical properties of coal seams, which needs undertaking full-waveform wide-band acoustic logging using cross-dipole sources.

**Keywords:** methane-bearing coal field, coal seam, permeability, matrix shrinkage, formation fluid flow, modeling.

**References**

1. Kirilchenko A. V., Khryukin V. T., Shvachko E. V. Methodological approaches to methane appraisal in coal seams as unconventional reservoirs. *Neдрopolzovanie-XXI vek*. 2015. No. 2(52). pp. 92–95.

2. Panina L. V., Zaytsev V. A., Mikhaylov V. O. The neotectonics and geodynamic development of the Naryk-Ostashkin Area (South Kuznetsk Basin). *Moscow University Geology Bulletin*. 2015. Vol. 70, No. 1. pp. 18–23.
3. Vasilev A. N., Shishlyayev V. V., Kirilchenko A. V. Implantation of percussion-rotary drilling technology and effective methods of geological field research in exploration coalbed methane fields. *Razvedka i okhrana neдр*. 2014. No. 7. pp. 45–49.
4. Sharipov B. I., Sizikov D. A., Shishlyayev V. V., Kuznetsov R. V. Applicability of different systems of mining methane-bearing coal seams in terms of geological conditions of the Naryk-Ostashkin field. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2016. No. 4(68). pp. 3–9.
5. Storonskiy A. N. Poro-permeability of coal seams. *Gazovaya promyshlennost*. 2012. Special issue No. 1(672). pp. 25–27.
6. Lei Yang. A Mixed Element Method for the Desorption-Diffusion-Seepage Model of Gas Flow in Deformable Coalbed Methane Reservoirs. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014.
7. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia, Chunliang Wang, Xihui Chen. Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture. *Adsorption*. 2016. Vol. 22, Iss. 3. pp. 315–325.
8. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shouqing Lu, Kan Jin. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. Vol. 24. pp. 245–251.
9. Ruimin Feng, Harplani S., Pandey R. Laboratory measurement of stress-dependent coal permeability using pulse-decay technique and flow modeling with gas depletion. *Fuel*. 2016. Vol. 177. pp. 76–86.
10. Seidle J. P., Huitt L. G. Experimental Measurement of Coal Matrix Shrinkage Due to Gas Desorption and Implications for Cleat Permeability Increases. *International Meeting on Petroleum Engineering*. Beijing, 1995.
11. Palmer I., Mansoori J. How Permeability Depends on Stress and Pore Pressure in Coalbeds: A New Model. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, 1996. pp. 539–544.
12. Khaydina M. P. Unconventional resources of hydrocarbons. Methane-bearing coal deposits: Teaching aid. Moscow : RGU нефти i gaza im. I. M. Gubkina, 2015. 101 p.
13. Thakur P. Advanced Reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane. Cambridge : Gulf Professional Publishing, 2017. 224 p.
14. Shi J. Q., Duracan S. Drawdown Induced Changes in Permeability of Coalbeds: A New Interpretation of the Reservoir Response to Primary Recovery. *Transport in Porous Media*. 2004. Vol. 56, Iss. 1. pp. 1–16.
15. Ji-Qun Shi, Sevket Duracan. Modelling laboratory horizontal stress and coal permeability data using S&D permeability model. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Vol. 131. pp. 172–176.