

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

# ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

**196** ЛЕТ

Издается с 1825 года  
(№ 2293)

**12.2021**

**FRD**  
FURUKAWA

**FURUKAWA ROCK DRILL**

**Японские буровые станки  
с высоким уровнем  
надёжности и производительности**

**Официальный дистрибьютор  
FURUKAWA ROCK DRILLS  
в России – ООО «Атриум»**

#### **ПОВЕРХНОСТНЫЕ БУРОВЫЕ СТАНКИ:**

- пневмударного бурения
- RC бурения (отбор шламовых проб)
- гидроперфораторного бурения

#### **ПОДЗЕМНЫЕ БУРОВЫЕ СТАНКИ:**

- проходческого бурения
- очистного бурения

#### **БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ:**

- пневмударный
- гидроперфораторный
- RC бурения
- вращательного бурения



РЕКЛАМА



ООО «Атриум»

**ООО «Атриум»**

**ПОСТАВКА · СЕРВИС · ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ · БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ**

Представительства: Владивосток, Хабаровск, Магадан, Москва

+7 (423) 257-67-01 // info@mining-tools.info // www.mining-tools.info

# СОДЕРЖАНИЕ

## ГЕОЛОГИЯ, ПОИСК И РАЗВЕДКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Гусев Е. А., Шнейдер Г. В., Рекант П. В., Каракозов А. А.**  
Результаты неглубокого бурения на Таймыре и на шельфе  
восточно-арктических морей России . . . . . 4

## СЫРЬЕВАЯ БАЗА

- Пономарева Г. А., Пономарев А. А.**  
Закономерности распределения платиноидов в галогенных  
формациях Южного Предуралья . . . . . 10

- Ковалев С. Г., Ковалев С. С.** Условия формирования  
Fe-Ti-минерализации при дифференциации расплава  
в промежуточной камере . . . . . 14

## ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССОВ

- Агарков И. Б., Игнатенко И. М., Овсянников А. Н.,  
Крючков И. С.** Классификация обрушений уступов карьера  
магнетит-апатитовых руд по типу и объему и оценка роли  
планетарной трещиноватости в их формировании . . . . . 21

## ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

- Шарф И. В., Пельменёва А. А.** Система льготирования  
нефтегазовых компаний в контексте реализации мировой  
климатической повестки . . . . . 26

## ПЕРЕРАБОТКА И КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

- Брюховецкий О. С., Секисов А. Г., Рассказова А. В.,  
Лавров А. Ю.** Повышение извлечения химически  
связанного золота при активационном кучном  
выщелачивании из упорных руд . . . . . 32

## ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- Никитин А. Ю., Елисеева Р. А., Юшина Т. И., Калугин А. И.**  
Опыт разработки и эксплуатации колонных флотационных  
машин НПО «СОМЭКС» для обогащения апатит-нефелиновых  
руд Хибинских месторождений . . . . . 37

- Шишлянников Д. И., Трифанов Г. Д., Кускова Я. В.**  
Повышение качества гранулометрического состава калийной  
руды, добываемой механизированным способом . . . . . 45

- Пелипенко Н. А., Бакланов Р. Р., Процук И. С.,  
Карпенко Н. Г.** Надежность горных машин и инструментов . . . . . 51

- Бусыгин А. М., Мишедченко О. А.**  
Самонастраивающаяся бурильная машина  
дифференциального типа с тремя степенями свободы . . . . . 56

- Баратов Б. Н., Умаров Ф. Я., Тошов Ж. Б.** Оценка  
работоспособности трехшарошечных буровых долот . . . . . 60

- Занг Куок Кхань, Кривенко А. Е., Пудов Е. Ю., Кузин Е. Г.**  
Разработка модели оценки эффективности системы  
охлаждения рабочей жидкости гидравлического карьерного  
экскаватора . . . . . 64

## АВТОМАТИЗАЦИЯ

- Кормщииков Д. С., Палеев Д. Ю., Минин И. В.**  
Внедрение программы «Аэросеть» на рудниках  
ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» . . . . . 70

- Тюпин В. Н., Игнатенко И. М., Агарков И. Б.,  
Крючков И. С.** Автоматизированный расчет параметров  
взрывных работ на основе показателя буримости  
трещиноватого массива при шарошечном бурении скважин  
на карьерах . . . . . 75

## ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

- Захаров В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А.,  
Шляпин А. В.** Газовые аномалии в угольном пласте . . . . . 80

- Шадрин А. В., Клишин В. И.** Организация работ  
по предотвращению динамических явлений на шахтах  
АО «СУЭК-Кузбасс» . . . . . 88

## ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА. КУЛЬТУРА

- Фомина М. И., Мальцева Н. В.** Музей естественной  
истории Северо-Восточного комплексного научно-  
исследовательского института ДВО РАН: первые шаги  
к познанию скрытых сокровищ Земли . . . . . 94

## МАЛОИЗВЕСТНЫЕ СТРАНИЦЫ ИЗ ЖИЗНИ ВЫДАЮЩИХСЯ ЛЮДЕЙ

- Рудник С. Н.** Георгий Валентинович Плеханов  
(к 165-летию со дня рождения) . . . . . 100

## ЮБИЛЕИ

- К юбилею Шешко Евгении Евгеньевны . . . . . 59

## ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Итоги XXIV сессии Межправительственного совета стран  
СНГ по разведке, использованию и охране недр . . . . . 105

- Памяти Потокина Вадима Евгеньевича . . . . . 37

- Содержание журнала за 2021 год . . . . . 106

## РЕКЛАМА

На обложке:

ООО «Атриум»

TECH MINING SIBERIA 2022 – Международная конференция  
и выставка «Новые технологии добычи полезных ископаемых»

На цветных полосах:

АО «СОМЭКС»

**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 in the area of mineral mining technologies – VNIIPromtekhologii  
(National Research and Design Institute for Industrial Technology) – Engineering Center of Rosatom  
State Atomic Energy Corporations’ Mining Division

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

Chairman of the managing board,  
Acting Chief Editor: **Alexander Vorobiev**

**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

*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

Leading editor: **Lyudmila Kostina**  
Editor: **Vera Elistratova**  
Junior editor: **Margarita Matveeva**  
Advertising manager: **Natalia Kolykhalova**  
Responsible for pre-printing work: **Daria Vorobyeva**

Printed in “Kancler” printing house

**CONTENTS****GEOLOGY, SEARCH AND EXPLORATION OF MINERALS**

- Gusev E. A., Shneider G. V., Rekant P. V.,  
Karakozov A. A.** Shallow drilling on the Taimyr Peninsula  
and on the shelf of the Eastern Arctic Seas of Russia . . . . . **4**

**RAW MATERIAL BASE**

- Ponomareva G. A., Ponomarev A. A.** Distribution patterns  
of platinoids in halogen rock masses in the Southern Urals . . . . . **10**  
**Kovalev S. G., Kovalev S. S.** Fe–Ti mineralization conditions  
during melt differentiation in intermediate zone . . . . . **14**

**PHYSICS OF ROCKS AND PROCESSES**

- Agarkov I. B., Ignatenko I. M., Ovsyannikov A. N.,  
Kryuchkov I. S.** Classification of slope failures in magnetite–  
apatite pit walls by type and volume, and the planetary jointing  
impact evaluation in this context . . . . . **21**

**ECONOMY, ORGANIZATION AND MANAGEMENT**

- Sharf I. V., Pelmeneva A. A.** Tax allowance of oil and gas  
companies in the context of world climate agenda . . . . . **26**

**PROCESSING AND COMPLEX USAGE OF  
MINERAL RAW MATERIALS**

- Bryukhovetsky O. S., Sekisov A. G., Rasskazova A. V.,  
Lavrov A. Yu.** Enhancement of chemically bound gold recovery  
in post-activation heap leaching of refractory ore . . . . . **32**

**EQUIPMENT AND MATERIALS**

- Nikitin A. Yu., Eliseeva R. A., Yushina T. I., Kalugin A. I.**  
Design and operation of SOMEX column flotation machines for  
processing the Khibiny apatite–nepheline ore . . . . . **37**

- Shshlyannikov D. I., Trifanov G. D., Kuskova Ya. V.**  
Improvement of particle size distribution in machine mining  
of potassium ore . . . . . **45**  
**Pelipenko N. A., Baklanov R. R., Protsuk I. S.,  
Karpenko N. G.** Reliability of mining machines and tools . . . . . **51**  
**Busygin A. M., Mishedchenko O. A.** Differential self-adapting  
drilling machine with three degrees of freedom . . . . . **56**  
**Baratov B. N., Umarov F. Ya., Toshov Zh. B.**  
Tricone drill bit performance evaluation . . . . . **60**  
**Giang Quoc Khanh, Krivenko A. E., Pudov E. Yu.,  
Kuzin E. G.** Performance evaluation model for power fluid  
cooling system of hydraulic excavators . . . . . **64**

**AUTOMATION**

- Kormshchikov D. S., Paleev D. Yu., Minin I. V.**  
Introduction of AeroSet software application in mines  
of Ural Mining and Metallurgical Company . . . . . **70**  
**Tyupin V. N., Ignatenko I. M., Agarkov I. B., Kryuchkov I. S.**  
Computerized design of blasting parameters based on drillability  
index of jointed rock mass in roller bit drilling in open pit mines . . . **75**

**INDUSTRY SAFETY AND LABOUR PROTECTION**

- Zakharov V. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A.,  
Shlyapin A. V.** Abnormal gas phenomena in coal seams . . . . . **80**  
**Shadrin A. V., Klishin V. I.** Dynamic phenomena prevention  
management in mines of SUEK-Kuzbass . . . . . **88**

**MINING HISTORY. CULTURE**

- Fomina M. I., Maltseva N. V.** Museum of Natural History at  
the Shilo North-Eastern Interdisciplinary Scientific Research  
Institute: A first step in perception of Earth’s hidden treasures . . **94**

## ГАЗОВЫЕ АНОМАЛИИ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ\*

**В. Н. ЗАХАРОВ**, директор, проф., д-р техн. наук, чл.-корр. РАН  
**В. А. ТРОФИМОВ**, зав. лабораторией, главный научный сотрудник,  
 д-р техн. наук, [asas\\_2001@mail.ru](mailto:asas_2001@mail.ru)  
**Ю. А. ФИЛИППОВ**, старший научный сотрудник, канд. техн. наук  
**А. В. ШЛЯПИН**, зам. директора, канд. техн. наук

Институт проблем комплексного освоения недр  
 им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

### Введение

Проблема выделения метана в горные выработки при разработке месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых в последние годы представляется весьма актуальной в связи с интенсификацией горных работ. Газовые проявления наблюдаются во многих случаях даже при извлечении различных руд, не говоря об угольных шахтах, где газовый фактор стал определяющим при обеспечении безопасности ведения добычных работ. Механизмы и закономерности массопереноса в существенной степени зависят от строения и свойств массива вмещающих горных пород, а также от конфигурации выработанного пространства для применяемых систем разработки месторождения. При описании массопереноса метана в угольных массивах важную роль играет проницаемость, которая может существенно варьироваться как по протяженности пласта, так и по времени. Имеются два основных фактора, определяющих изменение проницаемости – это нагруженность массива напряжениями и насыщенность его метаном. При отработке пласта они постоянно изменяются, в силу чего изменяется проницаемость и, следовательно, потоки флюидов (газ, вода).

Помимо этого, параметром, определяющим выход метана из угольного пласта в выработки и скважины, является, как уже отмечено, насыщенность угля метаном, т. е. количество метана в тонне (либо кубометре) угля. Для адекватного прогноза состояния шахтной атмосферы и, как следствие, оценки возможности ведения очистных работ знание этих параметров представляется весьма актуальным. Если первый из этих параметров адекватным образом может быть определен исключительно измерениями *in situ*, то проницаемость определяют как в натуральных условиях залегания пласта, так и лабораторным методом. В последнем случае возникает необходимость пропускания метана через, как правило, цилиндрический образец угля при различных условиях на его торцах. Измерительная процедура *in situ* связана с определением параметров газа, выходящего в скважину. В каждом случае происходит перетекание газа через границу, на которой изначально есть скачок давления, который со временем исчезает.

Представлен численный анализ развития со временем аномалий газового давления в угольном массиве. Рассмотрены временные характеристики процесса массопереноса газа и проведен их сравнительный анализ, показавший, что распад при других равных условиях протекает более интенсивно, чем заполнение аномалии. Выявлены условия, при которых заполнение протекает в аномальном режиме, когда проницаемая изначально область угольного массива становится непроницаемой, что ограничивает массоперенос газа. Показана возможность применения развитого подхода при интерпретации результатов определения проницаемости в лабораторных условиях.

**Ключевые слова:** уголь, метан, газовая аномалия, фильтрация газа, конечно-разностная схема, проницаемость, количество сорбированного газа, давление газа

**DOI:** 10.17580/gzh.2021.12.15

Теоретическому и экспериментальному изучению массопереноса в угольных образцах и непосредственно в пластах посвящены многочисленные исследования, хотя лишь в последнее время достигнуто понимание особенностей происходящих при этом процессов [1–9], что не в последнюю очередь связано с развитием вычислительных алгоритмов и возможностью использования высокопроизводительной вычислительной техники [10–16].

### Характеристика процесса массопереноса газа

Обобщая сказанное, будем полагать, что в силу ряда причин в угольном массиве (будь то угольный пласт или угольный образец) возможно возникновение аномалий газового давления, когда в некоторой его части газовое давление становится больше или меньше фонового. Для получения закономерностей массопереноса такое модельное представление может оказаться полезным, в связи с чем возникает вопрос о развитии во времени процессов фильтрации, обусловленных такой аномалией. Из общих физических соображений очевидно, что она будет каким-то образом трансформироваться, «размываться», постепенно сравниваясь с фоновыми значениями давления и концентрации метана. Однако интересен вопрос о временных показателях этого процесса с учетом начальных условий.

Чтобы не усложнять задачу, будем исходить из следующей модельной постановки. Рассматривается одномерная фильтрация, когда на участке оси  $x - L < x < L$  задано давление  $p_a$ , а при  $|x| > L$  давление равно  $p_f$ . При этом  $p_a$  может быть как больше  $p_f$ , так и меньше. В первом случае будет происходить постепенное «растекание» газа с повышенным давлением в заданной области, а во втором – его «втекание» в область пониженного давления из окружающей среды.

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-943 и European Commission Research Fund for Coal and Steel (RFCS) funded project «Advanced methane drainage strategy employing underground directional drilling technology for major risk prevention and greenhouse gases emission mitigation» GA: 847338 – DD-MET – RFCS-2018/RFCS-2018.

Поскольку имеет место симметричная постановка задачи относительно начала координат, то достаточно рассмотреть решение задачи только для  $x > 0$ , поставив при  $x = 0$  условие непротекания, т. е. условие симметрии газового потока. Иными словами, положить скорость потока при  $x = 0$ .

Что касается условия  $x = L$ , т. е. на границе стыковки двух фильтрационных областей, то возможны различные варианты сопряжения параметров фильтрации в этих областях.

Во-первых, можно считать, что на этой границе возможен свободный переток газа между областями. В этом случае давление в области аномалии  $x < L$  со временем либо повышается, либо понижается в зависимости от вида аномалии. В то же время за пределами аномалии ( $x > L$ ), хотя бы вблизи границы ( $x = L$ ), давление изменяется противоположным образом. При этом давление на самой границе тоже каким-то образом изменяется (в зависимости от параметров среды внутри и вне области  $x < L$ ).

Во-вторых, на границе можно задать постоянное давление, равное  $p_f$ . Физически это будет означать, что проницаемость окружающей среды велика, значительно больше, чем проницаемость в зоне аномалии, и она практически не оказывает влияния на поведение газа в области аномалии. Иными словами, это фильтрация газа из образца длиной  $L$ , на границах которого задано соответствующее давление  $p_f$ .

Далее будет использован именно такой подход. Отметим, что предполагается сравнение различных вариантов поведения аномалии давления, так что значения параметров задачи выбирают достаточно произвольно, но они должны быть одинаковыми для разных вариантов.

Принятая одномерная постановка задачи предполагает решение одномерного нелинейного параболического уравнения в частных производных, которое в общем случае имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( kp \frac{\partial p}{\partial x} \right) = m\mu \frac{\partial}{\partial t} \left[ p + \frac{RTbp}{m(1+bp)} \right], \quad (1)$$

где  $k$  – проницаемость угля;  $\mu$ ,  $p$  – вязкость и давление газа соответственно;  $m$  – пористость;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $a$ ,  $b$  – константы сорбции Ленгмюра.

Для численных расчетов примем следующие значения параметров:  $L = 0,05$  м;  $p_a = 30$  ат;  $p_f = 1$  ат;  $k_0 = 2,5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>. При этом численное решение этого уравнения выполняют с использованием конечно-разностного алгоритма, схема которого, граничные и начальные условия приведены в [17].

Рассмотрим далее несколько возможных вариантов развития аномалии, каждый из которых характеризуется определенным набором начальных и граничных условий. Первая серия вариантов связана с распадом аномалии. Как упоминалось ранее, внутри аномалии задано давление газа  $p_a$ , а на границе –  $p_f$ . При этом  $p_a > p_f$ , и газ постепенно со временем вытекает из зоны аномалии с падением давления в ней. При этом рассматриваются три различные задачи, а именно: первая – весь газ сосредоточен в порах в свободном состоянии (задана пористость  $m$ ) как внутри аномалии, так и вне нее, а сорбированный газ отсутствует; вторая – помимо свободного газа, присутствует сорбированный газ,

количество которого задается параметром  $Q$ , при этом массоперенос происходит при постоянной проницаемости  $k = \text{const}$ ; третья – аналогична второй, но  $k = \text{var}$  в зависимости от количества сорбированного газа  $Q$ , которое также уменьшается со временем.

Вторая серия вариантов связана с заполнением аномалии газом из окружающего угля, когда  $p_a < p_f$ . Что касается набора задач, то он аналогичен приведенному выше, но связан с противоположным направлением фильтрации – из окружающей среды внутрь аномалии.

Поскольку фильтроваться может лишь свободный газ, то сорбированный углем газ постепенно из-за изменения давления свободного газа сорбируется-десорбируется в зависимости от рассматриваемого варианта и тем самым также участвует в массопереносе. При этом не будем рассматривать кинетику сорбции-десорбции, т. е. будем считать этот процесс мгновенным и в связи с этим справедливым уравнение изотермы сорбции Ленгмюра, непосредственно связывающей количество сорбированного газа и его давление в пустотах (порах, трещинах) расчетной области.

Известно [18, 19], что в общем случае проницаемость среды зависит от сжимающих напряжений, действующих в ней, и количества сорбированного газа. Увеличение напряжений приводит к сокращению сечения проводящих фильтрационных каналов. Этому же способствует увеличение количества сорбированного газа в силу явления «набухания» угля. Что касается напряжений, то будем полагать их постоянство во всей области фильтрации и тем самым практически исключим их влияние на массоперенос.

Для определения  $k(Q, \sigma)$  воспользуемся соотношением [18, 19]

$$\frac{k}{k_0} = \left[ \frac{M(1-\sigma)^\mu - Q}{M(1-\sigma)} \right]^\nu, \quad (2)$$

где  $M$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  – эмпирические постоянные.

Соотношение (2) описывает поверхность в координатах  $k$ ,  $\sigma$ ,  $Q$ , пересечение которой с координатной плоскостью  $0\sigma Q$  определяет границу проницаемой области, вид которой, согласно (2), задается соотношением

$$Q_c = M(1-\sigma)^\mu. \quad (3)$$

Полагая справедливой изотерму сорбции Ленгмюра [18], получим, что этому количеству метана соответствует сорбционное давление

$$p_c = \frac{Q_c}{b(a-Q_c)}, \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$  – параметры сорбции в изотерме Ленгмюра.

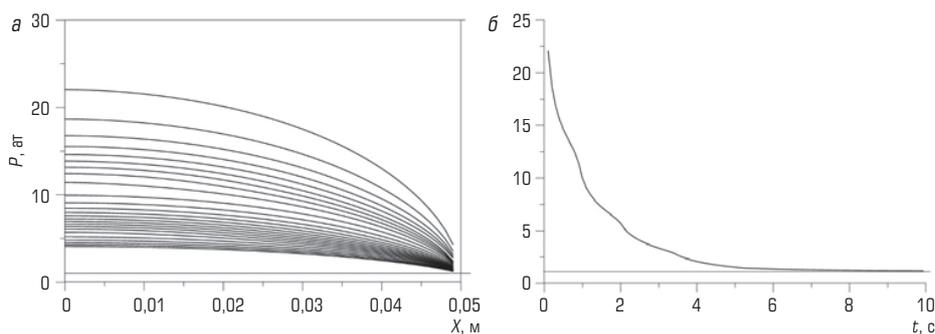
Для определенности положим  $\sigma = 0$ , т. е. рассмотрим ненагруженную среду, что на общие выводы не окажет существенного влияния.

В рассматриваемом случае соотношение (2) преобразуется в  $k/k_0 = [1 - Q/M]^\nu$ , (5)

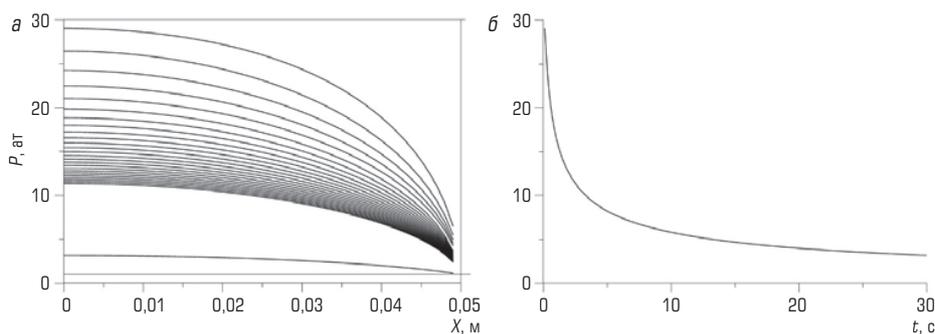
а для  $Q_c$  имеем

$$Q_c = M. \quad (6)$$

Таким образом, проницаемость определяется тремя параметрами  $k_0$ ,  $Q_c$  и  $\nu$ , первый из которых – это проницаемость полностью разгруженного и обезгаженного материала (угля),



**Рис. 1.** Изменение давления в области фильтрации со временем при распаде аномалии (а) и падение давления в средней части аномалии при  $x = 0$  (б) в случае отсутствия сорбированного газа



**Рис. 2.** Изменение давления в области фильтрации со временем при распаде аномалии (а) и падение давления в средней части аномалии при  $x = 0$  (б) при наличии сорбированного газа и выполнении условия  $k = \text{const}$

а второй – предельное количество газа в угле, при котором материал становится непроницаемым. Параметр  $\nu$  позволяет подобрать форму кривой (2, 5), в наибольшей степени приближенной к экспериментально определяемым зависимостям. Отметим, что именно параметр  $Q_c$  определяет границы проницаемой зоны, в которой реализуется фильтрация. При проведении соответствующих расчетов его величину принимали равной  $10 \text{ кг/м}^3$ , при этом соответствующая величина сорбционного давления составляла  $20 \text{ ат}$ .

### Распад газовой аномалии

Основываясь на этих положениях, рассмотрим в рамках распада аномалии решение первой из поставленных задач, т. е. задачи о распаде аномалии при отсутствии сорбированного газа.

Заметим, что рассматриваемые задачи являются модельными, их решение позволяет выявить качественное поведение некоторых искусственных аномалий с использованием реально допустимых значений параметров и сравнить различные типы таких аномалий.

На рис. 1, а показано распределение давления по длине зоны аномалии с шагом по времени в  $0,1 \text{ с}$ . Газ постепенно выходит из области через ее правую границу  $x = 0,05 \text{ м}$  при давлении в  $1 \text{ ат}$ , т. е. в атмосферу. В то же время во всей области давление постепенно падает от  $30$  до  $1 \text{ ат}$ , т. е. со временем аномалия полностью исчезает.

На рис. 1, б показано падение давления в центральной части аномалии на линии симметрии, т. е. при  $x = 0$ . Видно, что при  $t = 8 \div 10 \text{ с}$  процесс фильтрации практически заканчивается, т. е. весь газ выходит из области аномалии повышенного давления.

Отметим особенность графического представления результатов. Как видно из рис. 1, б, процесс истечения имеет

асимптотический характер, и, начиная с какого-то момента времени, параметры в зоне фильтрации изменяются достаточно медленно. По этой причине на рис. 1, а кривые распределения давления с заданным интервалом показаны лишь до момента  $\sim 3,5\text{--}4 \text{ с}$ . Последующие кривые практически сливаются и не отображены на рисунке. При этом, однако, показана кривая вблизи давления в  $1 \text{ ат}$  (нижняя на рисунке), которая является предельной в процессе фильтрации. При проведении расчетов максимальное время было принято  $t = 100 \text{ с}$ , т. е. на рисунке должно фактически присутствовать  $1000$  кривых.

Аналогичным образом в силу тех же причин и на других рисунках ниже показан неполный набор расчетных кривых.

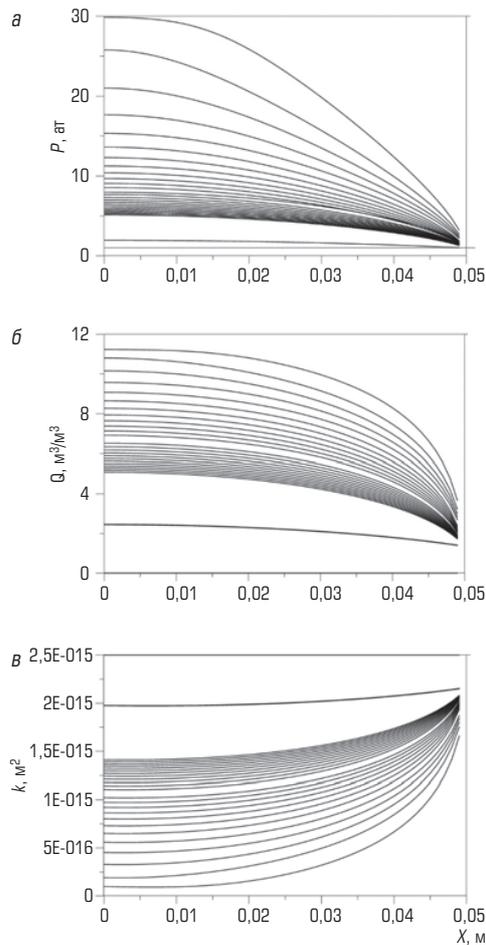
В рамках второй и третьей задач из первой серии, связанной с распадом аномалии, исследуем, какие же особенности вносит в процесс фильтрации учет сорбированного газа.

Очевидно, что в области аномалии давление, как и в первой задаче, будет постепенно падать, но при этом будет еще десорбироваться газ, подпитывая фильтрационный поток. Иными словами, следует ожидать увеличения характерного времени исчезновения аномалии.

Рассмотрим сначала фильтрацию с постоянной проницаемостью  $k = \text{const}$  (вторая задача). На рис. 2 приведены аналогичные рис. 1 графики распределения давления в зоне аномалии и падения давления на линии симметрии, т. е. при  $x = 0$ .

Сопоставление рис. 1, б и рис. 2, б свидетельствует о значительном возрастании времени исчезновения аномалии (более чем на порядок для принятых условий фильтрации).

Здесь же отметим, что при расчетах была использована изотерма сорбции Ленгмюра, что предполагает мгновенный процесс десорбции метана из угля. Возможный учет кинетики десорбции

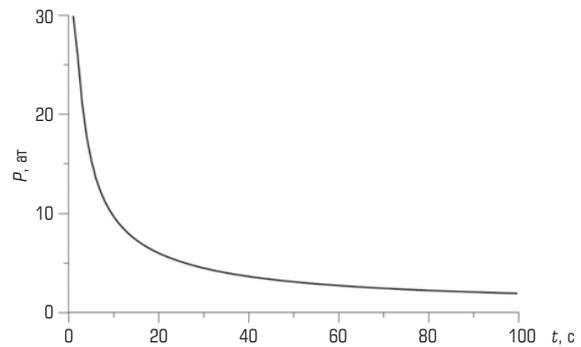


**Рис. 3.** Изменение давления в области фильтрации со временем при распаде аномалии (а), количества сорбированного газа (б) и проницаемости (в) при наличии сорбированного газа и выполнении условия  $k = var$

также замедляет выход метана из области аномалии и может оказать решающее влияние на полное время ее погашения.

Таким образом, наличие сорбированного метана при условии постоянства проницаемости принципиально не изменяет характера фильтрации, о чем свидетельствует сопоставление рис. 1 и 2, но значительно (на порядки) изменяет время фильтрации.

Рассмотрим теперь фильтрационный перенос в том случае, когда имеется зависимость проницаемости от количества сорбированного газа (зависимость от напряжений  $\sigma$  исключается тем, что рассмотрение всех задач идет для разгруженного угля, т. е. при  $\sigma = 0$ ). В этом случае процесс фильтрации становится существенно нелинейным, поскольку проницаемость угля зависит от характера протекания процесса, который, в свою очередь, зависит от проницаемости. В соответствии с [18] будем полагать для проницаемости справедливым соотношения (2) и (4). **Рис. 3, 4** отображают изменение параметров газового потока в области аномалии, а именно: давления газа  $P$ , количества сорбированного



**Рис. 4.** Падение давления в средней части аномалии при  $x = 0$  при наличии сорбированного газа и выполнении условия  $k = var$

газа  $Q$ , проницаемости  $k$ , а также падение давления газа в центре аномалии при  $x = 0$  м.

На рис. 3, как и ранее, также приведены кривые, соответствующие максимальному времени расчета в 100 с.

И в этом случае полученные результаты принципиально не отличаются от приведенных выше, а имеет место лишь количественное расхождение, хотя и значительное.

Таким образом, полученные результаты в рамках трех рассмотренных задач свидетельствуют о том, что распад аномалии повышенного давления представляет собой асимптотический процесс, продолжительность которого зависит от количества газа, находящегося в пределах аномалии в свободном и сорбированном состоянии. При этом наличие сорбированного газа может на порядки увеличить продолжительность процесса. Его окончанием при проведении сравнительных оценок в силу асимптотического характера падения давления можно считать момент времени, когда давление внутри аномалии станет меньше некоторой заданной малой величины. Сопоставление графиков на рис. 1, б, 2, б и 4 показывает, что для третьей задачи, т. е. в случае наличия сорбированного газа в аномалии с переменной проницаемостью, выход газа наиболее затруднен и занимает большее время. Это связано с тем, что в этом случае наблюдается меньшая средняя проницаемость области аномалии.

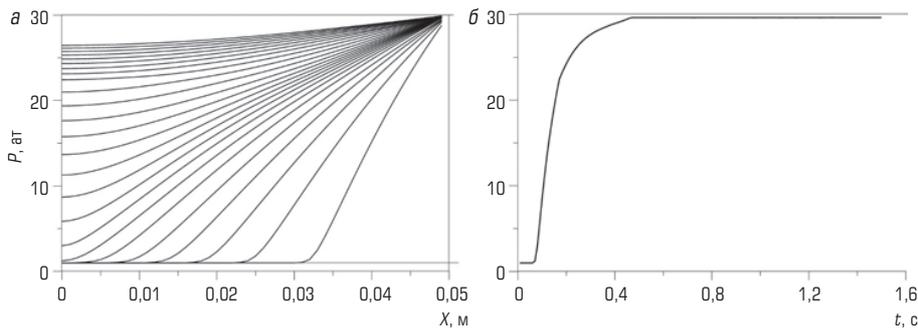
### Заполнение газовой аномалии

Проведем далее расчеты для задач второй серии вариантов, связанных с заполнением аномалии газом.

Рассмотрим первую задачу второй серии, для которой  $p_a = 1$  ат,  $p_f = 30$  ат при всех остальных параметрах из первой серии, т. е. случай, когда происходит заполнение аномалии без сорбции газа. Соответствующие графики для давления в области и граничного давления в точке симметрии при  $x = 0$  приведены на **рис. 5**.

Из рис. 5, б видно, что заполнение области пониженного давления произошло примерно за 0,5–0,6 с. Это на порядок быстрее, чем в случае распада аномалии.

Можно отметить наличие волны фильтрации, бегущей по области фильтрации с четко выраженным фронтом давления, впереди которой газ находится в невозмущенном состоянии.



**Рис. 5.** Изменение давления в области фильтрации со временем при заполнении аномалии (а) и рост давления в средней части аномалии при  $x = 0$  (б) в случае отсутствия сорбированного газа

Таким образом, газ не сразу достигает средней части аномалии, а спустя некоторое, вполне ощутимое время, о чем свидетельствует горизонтальный участок графика на рис. 5, б.

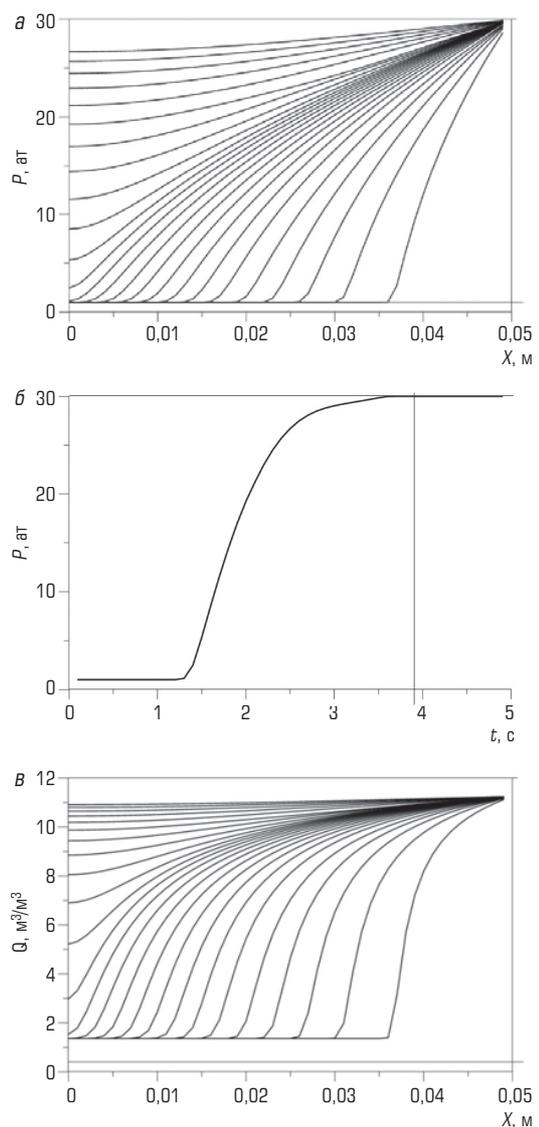
Таким образом, при чисто фильтрационном потоке исчезновение аномалии повышенного давления происходит значительно медленнее, чем пониженного. Это объясняется тем, что в первом случае фильтрационный процесс происходит на фоне более низкого среднего давления в области, чем во втором.

Рассмотрим теперь задачи с заполнением аномалии, когда вне ее существует высокое постоянное давление  $p_f = 30$  ат, а внутри в начальный момент времени  $p_a = 1$  ат, а именно: варианты с учетом сорбированного газа и постоянной либо переменной величиной проницаемости  $k$  (вторая и третья задачи из второй серии).

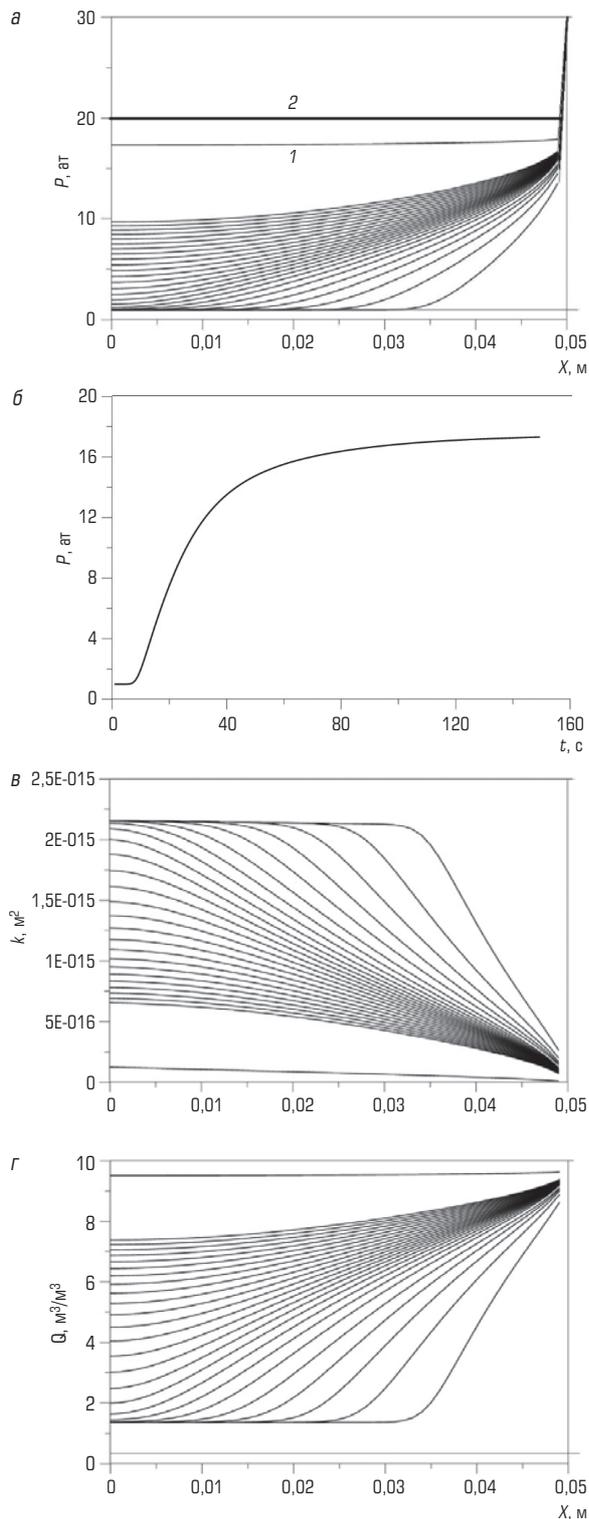
**Рис. 6** иллюстрирует наличие сорбированного газа, но фильтрация происходит при постоянной проницаемости. Поскольку в этом случае (см. рис. 6, б) в сравнении с рис. 1, происходит сорбционное поглощение, то очевидно, все временные характеристики увеличены в соответствии с сорбционной емкостью образца (угля).

Здесь также имеется волна фильтрации с фронтом, который движется от поверхности с приложенным давлением в 30 ат в глубь аномалии, к плоскости симметрии. Об этом свидетельствует горизонтальный отрезок графика на рис. 6, б при давлении в 1 ат. В рассматриваемом случае можно считать, что асимптотический процесс заполнения практически заканчивается при  $\sim 4$  с. Сопоставление графиков на рис. 2, б и 6, б свидетельствует, что и с учетом сорбированного газа заполнение аномалии происходит значительно более интенсивно, чем ее распад.

Особый интерес представляет заполнение аномалии, когда имеет место зависимость проницаемости от количества сорбированного газа (третья задача). В этом случае проницаемость становится переменной по всей области фильтрации, и может появиться зона с нулевой проницаемостью. При этом соотношение (2) при  $k = 0$  определяет положение границы между проницаемой и непроницаемой зонами в области фильтрации газа. Иными словами, если по каким-либо причинам в какой-то части фильтрующей области количество сорбированного газа станет равным или превысит величину  $Q_c$  в соответствии с формулами (3, 6), то в этой части величина проницаемости станет равной нулю. Иными словами, эта зона станет непроницаемой, и фильтрация через нее будет невозможна.



**Рис. 6.** Изменение давления в области фильтрации со временем при заполнении аномалии (а), падение давления в средней части аномалии при  $x = 0$  (б) и изменение количества сорбированного газа внутри аномалии (в) при наличии сорбированного газа и выполнении условия  $k = \text{const}$



**Рис. 7. Изменение давления в области фильтрации со временем при заполнении аномалии (а), падение давления в средней части аномалии при  $x = 0$  (б), изменение проницаемости (в) и количества сорбированного газа внутри аномалии (г) при наличии сорбированного газа и выполнении условия  $k = \text{var}$**

В связи с этим определяющую роль в рассматриваемых численных экспериментах играет величина  $p_f$ . Очевидно, что во всех рассмотренных выше фильтрационных переносах в пределах аномалии этот параметр определяет величину максимального давления во всей области в любое время, а давление во всех остальных точках области будет меньше этой величины (принцип максимума в параболических задачах). Если при этом  $p_f$  меньше  $p_c$ , то в области фильтрации не могут возникнуть непроницаемые зоны, и фильтрация пройдет, как и при  $k = \text{const}$ , но с другими числовыми показателями в соответствии с функциональной зависимостью (2).

Вариант  $p_f > p_c$  значительно усложняет теоретическое описание фильтрации, которое, однако, находит экспериментальные подтверждения.

Общие теоретические положения проиллюстрируем на примере решения конкретной задачи в ряду рассмотренных выше. Как и ранее, будем полагать  $p_f = 30$  ат, а величину  $p_c = 20$  ат в соответствии с изотермой сорбции, т. е. следует ожидать появления непроницаемых зон. Отметим, что расчеты выполнены в рамках общего алгоритма, использованного выше для решения и других задач эволюции газовой аномалии. На рис. 7 приведены графики расчетных параметров в этом случае. Рис. 7, б иллюстрирует изменение давления в средней части аномалии при  $x = 0$  м. Наблюдается постепенный асимптотический рост, который по завершении расчета (160 с) еще не прекращается. На рис. 7, а также показано распределение давления во всей области фильтрации с интервалом в 1 с. Часть кривых в силу сказанного выше не показана, но приведена некоторая кривая 1 на уровне  $\sim 17,5$  ат, соответствующая времени расчета 160 с. Графики на рис. 7, в, г демонстрируют распределение проницаемости и количества сорбированного газа в зоне аномалии.

Можно отметить основную особенность полученного результата. К изначально проницаемой области с заданной проницаемостью  $k_0 = 2,5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>, характерной для разгруженного и обезгаженного состояния угля, на одной из ее границ приложено постоянное, не изменяющееся во времени давление  $p_f = 30$  ат. В то же время давление внутри области по результатам расчета со временем не поднимается выше  $\sim 17,5$  ат. Подобные же расчеты показывают, что при повышении приложенного давления  $p_f$  давление внутри аномалии также незначительно повышается, но по-прежнему не достигает  $p_f$ , как это было в рассмотренных ранее вариантах.

Проанализируем далее возможный механизм такого поведения проницаемой области. Рассмотрим правую границу аномалии, на которой мгновенно задают давление в 30 ат. Это означает, что в первый момент времени возникает фильтрационный (диффузионный) поток в область и в непосредственной окрестности границы (возможно, доли миллиметра) давление повышается, но не до 30 ат, а до  $p_c = 20$  ат. Иными словами, эта малая окрестность границы весьма быстро становится непроницаемой, и хотя бы какое-то время фильтрационного переноса здесь нет. При этом на границу воздействуют 30 ат, а в непосредственной окрестности границы внутри области давление составляет 1 ат. Поток газа при фильтрации определяется произведением градиента давления на проницаемость, но здесь градиент давления

велик, а проницаемость равна нулю, и поэтому потока нет, т. е. пограничный слой играет роль закрытого клапана.

Дальнейшее продвижение газа можно описать итерационной процедурой, оперируя слоями, подобными упомянутому ранее. На следующем шаге первый слой играет роль границы области, затем второй и т. д. В то же время газ перетекает из первого слоя во второй, и давление в первом падает, что открывает возможность и для притока газа с границы в этот первый слой. То же происходит и с остальными слоями, и постепенно область заполняется газом. При этом давление в слоях не может стать большим  $p_c = 20$  ат, при котором проницаемость пропадает. В итоге вся область аномалии становится непроницаемой с давлением  $p_c = 20$  ат. Очевидно, что градиент давления метана внутри области весьма мал и, следовательно, скорость фильтрации и поток газа также малы.

Отметим, что, в соответствии с соотношениями (3), (6), асимптотическое значение давления на рис. 7, б составляет 20 ат. К нему график в силу описанной процедуры заполнения аномалии сможет приблизиться при весьма больших значениях времени, не доступных с позиций проведения расчетов. Аналогичное замечание относится к рис. 7, а. На нем асимптотическая кривая представляет собой горизонтальную прямую 2, проведенную на уровне 20 ат.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что процессы десорбции и сорбции не симметричны в полной мере при относительно больших давлениях газа (в сравнении с  $p_c$ ), хотя при небольших давлениях они полностью обратимы.

Подобного рода результаты находят экспериментальное подтверждение в [20], где описаны фильтрационные опыты с углем и метаном, в которых наблюдалось подобное поведение образца угля при попытке насытить его метаном. Разнообразные методики определения газодинамических параметров угля основаны на циклических процессах сорбции-десорбции метана углем, выполняемых в различных режимах нагружения и газового давления. Попытка повторно насытить уголь метаном до его начального состояния перед началом последующей десорбции может не привести к ожидаемому результату в силу закономерностей сорбции, отображенных в последнем расчетном варианте и показанных на рис. 7. Иными словами, уголь при выполнении описанных выше условий невозможно насытить до его исходных значений в угольном пласте.

### Заключение

Проведенное численное моделирование в совокупности с экспериментальными данными позволило выявить некоторые особенности фильтрации метана в угле, связанные с его циклической сорбцией-десорбцией. Подобного рода закономерности необходимо иметь в виду при интерпретации результатов определения фильтрационных и сорбционных параметров угля в лабораторных исследованиях, когда одним из необходимых действий является восстановление исходного состояния образца путем насыщения его метаном. Многочисленные эксперименты показывают, что такая процедура во многих случаях не приводила к желаемому результату. Проведенные исследования объясняют причину этого.

### Библиографический список

- Zhang Li, Zhang Hui, Guo Hao. A case study of gas drainage to low permeability coal seam // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27. Iss. 4. P. 687–692.
- Xiaolei Liu, Caifang Wu, Guoying Wei, Xiaodong Zhang, Tianrang Jia et al. Adsorption deformation characteristics of coal and coupling with permeability during gas injection // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 195. 107875. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107875
- Junhui Wang, Zhijun Wan, Yi Wang, Zhixiang Liu, Sifei Liu et al. Effect of Stress and Moisture Content on Permeability of Gas-Saturated Raw Coal // Hindawi Geofluids. 2020. Vol. 2020. ID 8837758. DOI: 10.1155/2020/8837758
- Shouqing Lu, Chengfeng Wang, Mingjie Li, Zhanyou Sa, Yongliang Zhang et al. Gas time-dependent diffusion in pores of deformed coal particles: Model development and analysis // Fuel. 2021. Vol. 295. 120566. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120566
- Gaoming Wei, Hu Wen, Jun Deng, Li Ma, Zhenbao Li et al. Liquid CO<sub>2</sub> injection to enhance coalbed methane recovery: An experiment and in-situ application test // Fuel. 2021. Vol. 284. 119043. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119043
- Khoa M. Tran, Ha H. Bui, Giang D. Nguyen. DEM modelling of unsaturated seepage flows through porous media // Computational Particle Mechanics. 2021. DOI: 10.1007/s40571-021-00398-x
- Jianhua Li, Bobo Li, Zhihe Wang, Chonghong Ren, Kang Yang et al. A permeability model for anisotropic coal masses under different stress conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 198. 108197. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108197
- Chonghong Ren, Bobo Li, Jiang Xu, Yao Zhang, Jianhua Li et al. A Novel Damage-Based Permeability Model for Coal in the Compaction and Fracturing Process Under Different Temperature Conditions // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. P. 5697–5713.
- Xuexi Chen, Liang Zhang, Maoliang Shen. Experimental research on desorption characteristics of gas-bearing coal subjected to mechanical vibration // Energy Exploration & Exploitation. 2020. Vol. 38. Iss. 5. P. 1454–1466.
- Равшанов Н. Численное исследование процесса нестационарной фильтрации газа при изотермическом режиме // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. № 1(31). С. 36–56.
- Морозкин Н. Н. Исследование процесса нестационарной фильтрации вязкопластичной нефти // Нефтяное хозяйство. 2016. № 6. С. 112–114.
- Файзиев Х., Хожиев Т. К., Хажиев И. О., Рахимов Ш. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах с учетом фильтрационной анизотропности грунтов методом конечных разностей // Известия вузов. Строительство. 2017. № 7(703). С. 66–74.
- Перейра Магальяес Г. Ю., Карякин И. Ю. Моделирование двумерной однофазной фильтрации сжимаемой жидкости (на примере ТНЦ) // Математическое и информационное моделирование : сб. науч. тр. – Тюмень : Изд-во Тюменского государственного ун-та, 2017. Вып. 15. Ч. 1. С. 287–294.
- Закиров Э. С., Индрупский И. М., Анисеев Д. П. Проблемы численного моделирования разработки месторождений с использованием коммерческих симуляторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2016. № 6. С. 52–58.
- Васильев В. И., Васильева М. В., Никифоров Д. Я. Решение задач однофазной фильтрации методом конечных элементов на вычислительном кластере // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2016. № 6(56). С. 31–40.
- Шурина Э. П., Иткина Н. Б., Трофимова С. А. Математическое моделирование процесса просачивания в пористой среде на базе неконформных смешанных конечно-элементных постановок // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 5. С. 42–54.
- Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Основные положения и характерные особенности фильтрации газа в угольных пластах // ГИАБ. 2000. № 8. С. 79–84.
- Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений // ФТПРПИ. 2016. № 2. С. 16–25.
- Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Природа и механизм формирования газопроницаемых зон в угольных пластах // ФТПРПИ. 1999. № 1. С. 21–27.
- Аверин А. П., Белоусов Ф. С., Пашичев Б. Н., Трофимов В. А. Закономерности фильтрации газа через образец горной породы // ГИАБ. 2021. № 10. С. 100–111. **PK**

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 12, pp. 80–87  
DOI: 10.17580/gzh.2021.12.15

**Abnormal gas phenomena in coal seams**

**Information about authors**

**V. N. Zakharov**<sup>1</sup>, Director, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

**V. A. Trofimov**<sup>1</sup>, Head of Laboratory, Chief Researcher, Doctor of Engineering Sciences, asas\_2001@mail.ru

**Yu. A. Filippov**<sup>1</sup>, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

**A. V. Shlyapin**<sup>1</sup>, Deputy Director, Candidate of Engineering Sciences

<sup>1</sup>Academician Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources—IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract**

The problem connected with methane emission in metallic and nonmetallic mines becomes highly pressing today in view of the current surge in the mining industry. Gas emissions are often observed even in ore mines, let alone coal mining where the gas criterion is the determinant of operational safety. The mechanisms and patterns of mass transfer greatly depend on the structure and properties of enclosing rock mass, as well as on the configuration of mined-out area and certain mining systems. The article presents the numerical analysis of time history of gas pressure in coal seams. The time response characteristics of gas mass transfer are studied and compared, and it is shown that desorption occurs at higher intensity than absorption, other things being equal.

The conditions of abnormal absorption are found, when a naturally permeable area in a coal seam becomes impermeable, which limits gas mass transfer. The applicability of the proposed approach in interpretation of laboratory test data on permeability is illustrated. The implemented numerical modeling in combination with the experimental data have revealed some specific features of methane flow in coal, connected with cyclic gas sorption–desorption.

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-943, and by the European Commission Research Fund for Coal and Steel (RFCS, Project: Advanced methane drainage strategy employing underground directional drilling technology for major risk prevention and greenhouse gases emission mitigation GA: 847338—DD-MET—RFCS-2018/RFCS-2018).

**Keywords:** coal, methane, gas abnormality, gas flow, finite difference scheme, permeability, absorbed gas, gas pressure.

**References**

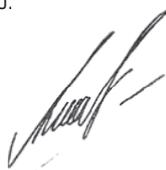
- Zhang Li, Zhang Hui, Guo Hao. A case study of gas drainage to low permeability coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. Vol. 27, Iss. 4. pp. 687–692.
- Xiaolei Liu, Caifang Wu, Guoying Wei, Xiaodong Zhang, Tianrang Jia et al. Adsorption deformation characteristics of coal and coupling with permeability during gas injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 195. 107875. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107875
- Junhui Wang, Zhijun Wan, Yi Wang, Zhixiang Liu, Sifei Liu et al. Effect of Stress and Moisture Content on Permeability of Gas-Saturated Raw Coal. *Hindawi Geofluids*. 2020. Vol. 2020. ID 8837758. DOI: 10.1155/2020/8837758

- Shouqing Lu, Chengfeng Wang, Mingjie Li, Zhanyou Sa, Yongliang Zhang et al. Gas time-dependent diffusion in pores of deformed coal particles: Model development and analysis. *Fuel*. 2021. Vol. 295. 120566. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120566
- Gaoming Wei, Hu Wen, Jun Deng, Li Ma, Zhenbao Li et al. Liquid CO<sub>2</sub> injection to enhance coalbed methane recovery: An experiment and in-situ application test. *Fuel*. 2021. Vol. 284. 119043. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119043
- Khoa M. Tran, Ha H. Bui, Giang D. Nguyen. DEM modelling of unsaturated seepage flows through porous media. *Computational Particle Mechanics*. 2021. DOI: 10.1007/s40571-021-00398-x
- Jianhua Li, Bobo Li, Zhihe Wang, Chonghong Ren, Kang Yanga et al. A permeability model for anisotropic coal masses under different stress conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 198. 108197. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108197
- Chonghong Ren, Bobo Li, Jiang Xu, Yao Zhang, Jianhua Li et al. A Novel Damage-Based Permeability Model for Coal in the Compaction and Fracturing Process Under Different Temperature Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. pp. 5697–5713.
- Xuexi Chen, Liang Zhang, Maoliang Shen. Experimental research on desorption characteristics of gas-bearing coal subjected to mechanical vibration. *Energy Exploration & Exploitation*. 2020. Vol. 38, Iss. 5. pp. 1454–1466.
- Ravshanov N. Numerical study of the process of non-stationary gas filtration in isothermal mode. *Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki*. 2021. No. 1(31). pp. 36–56.
- Morozkin N. N. Researching the problem of nonstationary filtration of viscoplastic oil. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2016. No. 6. pp. 112–114.
- Fayziev Kh., Khozhiev T. K., Khazhiev I. O., Rakhimov Sh. Numerical solution of unsteady filtration in earth dams with considering filtration anisotropically ground finite difference method. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2017. No. 7(703). pp. 66–74.
- Pereira Magalhaes G. Ju., Karyakin I. Yu. Modeling 2D single-phase flow of compressible fluid : A case-study of Tyumen Petroleum Research Center. *Mathematical and Informational Modeling : Collection of Scientific Papers*. Tyumen : Izdatel'stvo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. Vol. 15, Iss. 1. pp. 287–294.
- Zakirov E. S., Indrupskiy I. M., Anikeev D. P. Problems of numerical simulation of fields' development using commercial simulation software. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdeniy*. 2016. No. 6. pp. 52–58.
- Vasilev V. I., Vasileva M. V., Nikiforov D. Ya. Solving one phase filtration problems using finite element method on computing cluster. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammasova*. 2016. No. 6(56). pp. 31–40.
- Shurina E. P., Itkina N. B., Trofimova S. A. Mathematical modelling of the filtration process in a porous medium based on non-conformal mixed finite element formulation. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2020. Vol. 25, No. 5. pp. 42–54.
- Kuznetsov S. V., Trofimov V. A. General provisions and peculiarities of gas flow in coal seams. *GIAB*. 2000. No. 8. pp. 79–84.
- Zakharov V. N., Malinnikova O. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A. Effect of gas content and actual stresses on coalbed permeability. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, Iss. 2. pp. 218–225.
- Kuznetsov S. V., Trofimov V. A. Gas-permeable zones in coal seams and the nature and mechanism by which they form. *Journal of Mining Science*. 1999. Vol. 35, Iss. 1. pp. 19–25.
- Averin A. P., Belousov F. S., Pashichev B. N., Trofimov V. A. Gas flow patterns in rock samples. *GIAB*. 2021. No. 10. pp. 100–111.

От имени коллектива Акционерного общества «Туганский горно-обогатительный комбинат «Ильменит» выражаю благодарность редакции «Горного журнала» за высокий профессионализм по выпуску в журнале № 10 2021 г. статьи о создании в Томской области новой горнодобывающей и перерабатывающей отрасли для промышленного освоения Туганского титаноциркониевого россыпного месторождения, производственном потенциале и перспективах развития Туганского ГОКа.

Желаем журналу дальнейшего процветания, новых достижений, идей, вдохновения на интересные проекты и публикации. Благодарим за совместную работу и надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

С уважением  
Генеральный директор



**А. А. Кабанов**

