

О ДЕГАЗАЦИИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА В КРОВЛЕ ОТРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

В.Н. Захаров¹, В.А. Трофимов¹, Ю.А. Филиппов¹, А.В. Шляпин¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр, Москва, Россия, e-mail: Shlyapin@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены различные аспекты массопереноса метана в углепородном массиве и возможности использования протяженных горизонтальных скважин в кровле угольного пласта для его дегазации. Значительное внимание уделено анализу изменения напряженно-деформированного состояния пород кровли по мере развития выработанного пространства. Показано, что при отработке пласта протяженными выемочными столбами с длиной лавы в несколько сотен метров практически вся отработка происходит в режиме с полной посадкой кровли в центральной части столба. На большей протяженности остальной части происходит частичная посадка, и только вблизи забоев и боковых границ столба формируются зоны зависающей кровли. В соответствии с характером взаимодействия пород кровли и почвы в массиве формируются области разгрузки от вертикальных сжимающих напряжений. В этих зонах создается значительная проницаемость, обеспечивающая интенсивную фильтрацию метана. При этом расположение дегазационной скважины относительно кровли пласта существенным образом определяет эффективность удаления метана из массива. Вместе с тем в большей степени выход метана определяется величиной зоны разгрузки в кровле пласта и выходом через кровлю в выработанное пространство, даже при наличии нескольких дегазационных скважин.

Ключевые слова: метан, углепородный массив, фильтрация, напряженно-деформированное состояние, проницаемость, дегазационная скважина, разгрузка, численное моделирование.

Благодарность: 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.

Для цитирования: Захаров В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Шляпин А. В. О дегазации углепородного массива в кровле отрабатываемого угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 20–36. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_20.

About degassing of coal-rocks massif in the roof of coal seam being worked out

V.N. Zakharov¹, V.A. Trofimov¹, Yu.A. Filippov¹, A.V. Shlyapin¹

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: Shlyapin@mail.ru

Abstract: The article is devoted to the consideration of various aspects of methane mass transfer in a coal-rock massif and the possibility of using extended horizontal bore-holes in the roof of a coal seam for its degassing. Considerable attention is paid to the analysis of changes in the stress-strain state of roof rocks as the developed space develops. It is shown that during the development of the seam by long extraction columns with a longwall length of several hundred meters, almost all mining occurs in the mode with a complete roof landing in the central part of the column. As to a greater length of the rest part, a partial landing occurs, and only near the faces and side boundaries of the column, zones of a hanging roof are formed. In accordance with the nature of the interaction between the rocks of the roof and the bottom, areas of relief from vertical compressive stresses are formed in the massif. Significant permeability is created in these zones, providing intensive methane filtration. Wherein, the location of the degassing well relative to the roof of the formation significantly determines the efficiency of methane removal from the array. At the same time, largely, the methane output is determined by the size of the discharge zone in the roof of the formation and the exit through the roof into the developed space, even in the presence of several degassing boreholes.

Key words: methane, coal-rock massif, filtration, stress-strain state, permeability, degassing boreholes, unloading, numerical modeling.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-943 and the 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.

For citation: Zakharov V. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Shlyapin A. V. About degassing of the coal-rocks massif in the roof of the coal seam being worked out. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):20-36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_20.

Введение

В статье рассматриваются особенности использования горизонтальных скважин в кровле угольного пласта для дегазации углепородного массива. Теоретически и экспериментально показано, что деформирование и разрушение пород кровли постепенно увеличивающегося выработанного пространства в значительной степени определяют закономерности массопереноса флюидов, его интенсивность и направление. В связи с этим исследование напряженно-деформированного состояния пород кровли является первостепенной задачей в описании миграционных процессов газов исследуемого массива.

Вопросами описания состояния пород в кровле угольного пласта в различных аспектах занимались многочисленные исследователи на протяжении многих лет [1, 2]. Тем не менее до настоящего времени активно ведется изучение протекающих процессов, что в основном связано с появлением более совершенных методов решения соответствующих геомеханических задач [3–5], недоступных для решения ранее.

Помимо размеров выработанного пространства, также и свойства углепородного массива, в частности его строение, определяют особенности его деформирования и разрушения при отработке залежи. Можно отметить несколько ти-

пичных примеров такого строения. В-первых, это наличие мощного прочного и упругого пласта песчаника на некотором расстоянии от кровли отрабатываемого пласта. Он выполняет роль основной кровли, и фактически все работы выполняются под его защитой. Очевидно, что в зависимости от его мощности и расстояния до пласта он может либо сохранять целостность и деформироваться без образования секущих разрывов, либо в нем с определенным шагом (шаг посадки) происходит разрушение с образованием вертикальных трещин. Промежуточное состояние характеризуется тем, что во избежание внезапных самопроизвольных посадок производят принудительные обрушения кровли.

Очевидно, что в процессе отработки происходит постепенное опускание всей толщи налегающих пород, начиная от кровли выработанного пространства, фактически вплоть до дневной поверхности. Это опускание неравномерно по их толщине и зависит от горнотехнической обстановки при отработке залежи полезного ископаемого, либо при создании подземного сооружения. Если мощность вынимаемого слоя не очень велика, т.е. образующееся пустое пространство имеет незначительную высоту, то породы кровли и почвы могут сомкнуться при определенном развитии очистных (выемочных) горных работ, т.е. кровля опустится на почву. В противном случае образуется камера с зависающей кровлей. Как в первом, так и во втором случае часть пород кровли отслаивается и осыпается в свободное пространство выработки. Представляет несомненный интерес, сколько же породы осыплется и сколь далеко в массив распространится процесс такого поверхностного разрушения.

Однако разрушение в массиве затрагивает не только непосредственную кровлю, приводя к обрушению пород,

а распространяется значительно глубже в массив, изменяя его деформационно-прочностные параметры в зависимости от характера и интенсивности разрушения.

Альтернативой описанному поведению массива является разрушение мелкослоистой трещиноватой кровли, когда при достижении определенного пролета зависающей кровли происходит лавинное разрушение с образованием купола над всем выработанным пространством. Высота этого купола может достигать десятков метров, а при определенных обстоятельствах купол может достигать дневной поверхности с образованием на ней воронки [6].

Напряжения в кровле угольного пласта

Исследование напряженного состояния углепородного массива весьма важно с точки зрения того, что оно определяет его проницаемость, и как следствие, динамику массопереноса флюидов (метана) [7].

В общем случае это состояние характеризуется тремя главными напряжениями, два из которых в спокойно залегающих массивах связаны с двумя взаимно перпендикулярными направлениями в горизонтальной плоскости, а третье с вертикалью, которая в подобных массивах всегда является главным направлением. Заметим, что в первую очередь это относится к осадочным массивам с горизонтальным расположением слоев, хотя может быть применено и в других случаях, что требует экспериментального подтверждения. Считается, что имеет место и находит экспериментальное подтверждение линейная зависимость исходных напряжений от глубины расположения рассматриваемой точки массива, т.е. от расстояния ее до поверхности [8]. Это относится как к вертикальной компоненте исходных

напряжений, так и к горизонтальным, очевидно с разными градиентами по глубине.

Практически все горные работы связаны с отделением и удалением части пород массива с образованием новых, как правило, свободных от нагрузок, поверхностей. Поскольку эти поверхности, виртуальные до отделения части массива, находились под воздействием исходных напряжений, а потом стали свободными, то имеет место снятие напряжений на этой части образующейся поверхности, т.е. разгрузка массива. В определенных местах массива исходные сжимающие напряжения уменьшаются по величине, и могут стать даже растягивающими. Тем не менее, в других местах они могут возрасти в силу конфигурации области, образуя зоны концентрации сжимающих напряжений. И те, и другие могут стать источниками разрушения в массиве. Первые «ответственны» за формирование и развитие трещин растяжения, а вторые связаны с выполнением различного рода критериев прочности, в основном сдвигового характера.

Анализ экспериментального материала и результатов решения различных геомеханических задач показывает, что зоны разгрузки приурочены к массиву в кровле (и почве) выработанного пространства. Именно здесь происходит существенное уменьшение исходных сжимающих напряжений, вплоть до нуля на вновь образующейся поверхности кровли выработки. Более того, при определенных условиях вблизи этой кровли формируются растягивающие напряжения [8] как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях.

Известно, что горные породы обладают определенным пределом прочности на растяжение, как правило, незначительным. В связи с этим не всякие растягивающие напряжения будут фор-

мировать новые трещины растяжения в массиве. Хотя будут способствовать раскрытию и росту уже существующих.

Аналитическое решение

Рассмотрим подробнее, что же происходит в зоне разгрузки массива над выработанным пространством. Для этого будем считать, что породы массива могут деформироваться в соответствии с некоторой деформационной моделью, скажем, упругой. Известный факт, что фактически любой нелинейный материал при разгрузке деформируется линейным образом в связи с тем, что в любой деформации всегда присутствует доля упругой деформации.

Таким образом, при разгрузке весь налегающий массив должен претерпеть упругое восстановление. Конечно же, оно будет неоднородно по всему этому массиву, хотя бы из-за изменения исходных напряжений с глубиной.

Поскольку выработанное пространство всегда ограничено по протяженности, то краевые части обрабатываемого пласта оказывают воздействие на кровлю, поддерживая ее от излишнего опускания, и тем самым нагружаясь сверх исходного состояния. В них возникают зоны концентрации напряжений.

Тем не менее, наличие краевых частей настолько изменяет исходное поле напряжений, искривляя его, что в частях массива вблизи кровли могут сформироваться зияющие трещины [9], образующиеся как трещины растяжения-сдвига.

Детальный анализ полученного решения приводит к определению параметров зон растяжения по вертикальным и горизонтальным направлениям на разных этапах развития очистных работ (число возле кривой — нормированная длина очистного пространства). На рис. 1 показано последовательное изменение конфигурации зоны растягивающих вертикальных напряжений. При этом ли-

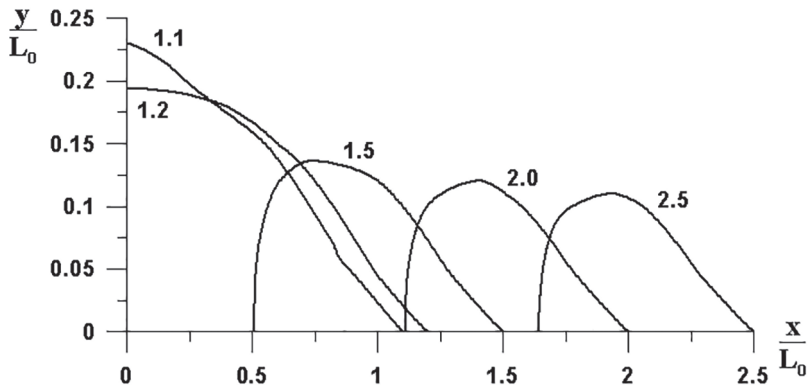


Рис. 1. Изменение формы зоны растягивающих вертикальных напряжений по мере роста протяженности выработанного пространства

Fig. 1. Changing the shape of the zone of stretching vertical stresses as the length of the developed space increases

нейные размеры нормированы на величину L_0 — максимально возможную протяженность зависающей кровли.

Приведенный график дает возможность определить, попадет ли планируемая скважина в зону растягивающих напряжений, и на каком участке.

При этом массив по мере развития очистных работ сначала разгружается при зависании кровли до момента касания ее и почвы, а затем опять нагружается и практически восстанавливает свое исходное состояние по напряжениям на большей части протяженности кровли. Такого рода задача рассмотрена ранее в [10].

Численное решение

Альтернативный подход связан с использованием численного моделирования. При моделировании ширина лавы полагалась равной 300 м при длине обрабатываемого столба в 1000 м. Фактическая же его длина значительно больше ~3000 м.

Расчеты, однако, показывают, что при больших длинах выработанного пространства (в сравнении с его шириной) оседание массива контролируется в первую очередь именно его шириной, а не длиной. Можно сказать, что в этом случае деформационная ситуация приближается к плоско деформированному состоянию, когда длина фактически отсутствует (рис. 2). В рассматриваемом случае отношение длины к ширине составляет ~3, что позволяет не увеличи-

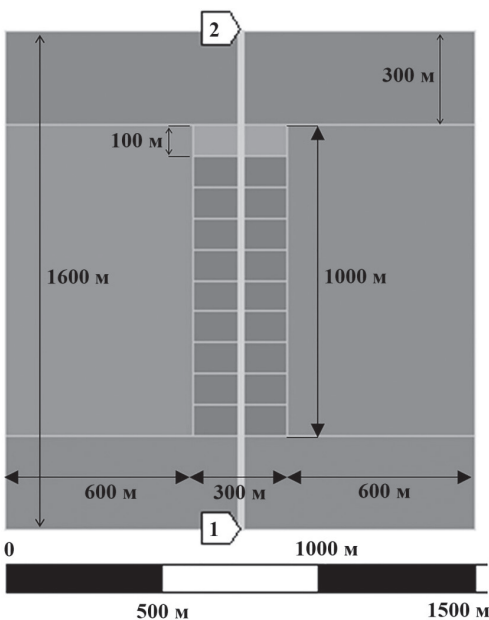


Рис. 2. Схема расчетной области

Fig. 2. Calculation area diagram

вать длину более 1000 м. Это важно с точки зрения экономии вычислительных ресурсов. Местоположение скважины в пределах расчетной области, ее начала и конца обозначены цифрами 1, 2.

Проведенное моделирование в 3D постановке позволяет получить все компоненты напряженно-деформированного состояния во всей расчетной области, хотя и с невысоким разрешением, когда трудно выделить объекты размером в несколько метров, что определяется размерами используемой сетки конечных элементов. Тем не менее, подход позволяет дать общее представление о характере распределения искомым параметров, что бывает недостижимо в рамках другого подхода, особенно при сложном геологическом строении массива.

На рис. 3 для примера показан общий вид расчетной модели и отработываемого столба, а также распределение вертикальных смещений по вертикаль-

ному сечению над средней линией на расстоянии 20 м от кровли пласта.

Очевидно, что в рассматриваемом случае происходит полная посадка кровли, и на большей части протяженности скважины, если она пройдена по этой линии, она опускается на 1,5 м, т.е. на мощность вынимаемого пласта. В то же время концевые части скважины испытывают разнонаправленный изгиб с той же амплитудой в 1,5 м на протяженности в 100 м. Такой градиент смещений не может оказать существенного влияния на целостность скважины.

Общие положения о скважине в кровле пласта

Массоперенос флюидов в пористых горных породах — это одна из наиболее развиваемых тем на протяжении многих лет. Результаты исследований нашли отражение во многих статьях и монографиях, опубликованных в прошедшие

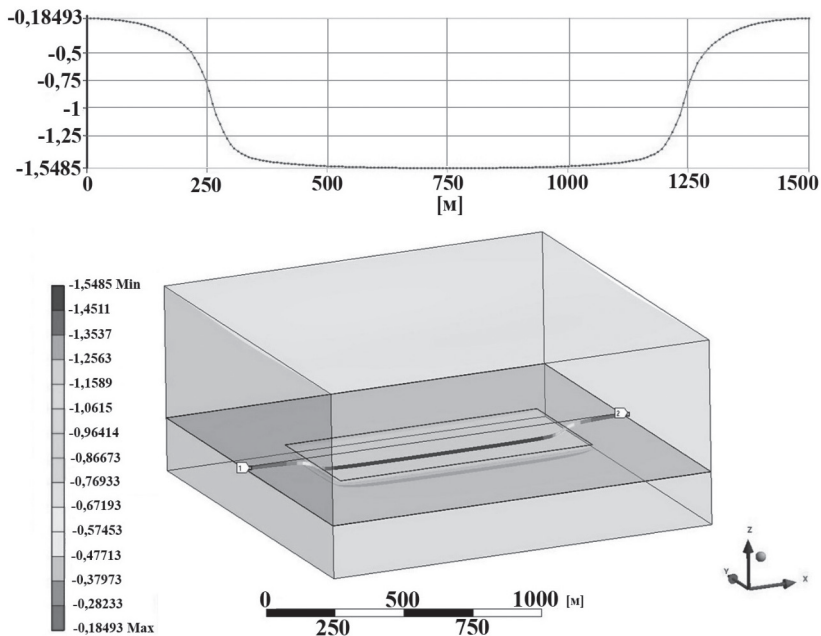


Рис. 3. 3D модель углепородного массива и распределение вертикальных смещений вдоль траектории скважины после полной отработки столба

Fig. 3. 3D model of coal-rock massif and the distribution of vertical displacement along the trajectory of borehole after the complete development of column

годы [11]. Однако и в настоящее время в рассматриваемой области находится немало проблем, требующих проведения исследований. Среди множества факторов, влияющих на массоперенос наиболее важным для многих исследователей представляется наличие трещиноватости, детальному изучению которой посвящено множество работ, вышедших в последнее время [12–16 и многие другие]. Другое направление не менее успешно развивается в рамках интегрального учета трещиноватости в виде зависимости проницаемости от определяющих параметров процесса [17–21 и многие другие].

Рассматриваемая технология дегазации углепородного массива предполагает бурение скважин параллельно кровле пласта на некотором расстоянии от последнего. Это расстояние является параметром, который определяется из условия наибольшей дегазации массива за возможно меньший промежуток времени, т.е. при реализации наибольшей скорости газовыделения метана в скважину. Эта скорость и количество вышедшего метана определяются из решения соответствующей газодинамической задачи о массопереносе метана в углепородном массиве.

В решении этой задачи, определяющую роль играет расстояние скважины от угольного пласта. При его отработке в кровле выработанного пространства образуются зоны разгрузки от исходных напряжений и, более того, зоны растяжения, как по вертикальным, так и по горизонтальным напряжениям. В этих зонах в зависимости от свойств породы (главным образом мелкой трещиноватости) может возникнуть руинное разрушение, которое полностью погасит скважину, и она перестанет существовать. Отметим, что вертикальные размеры этих зон могут быть достаточно велики, достигая десятков метров, во многих

случаях вплоть до дневной поверхности. Практически любая горизонтальная скважина будет затронута этими зонами и попадет в область разрушения массива на той или иной протяженности.

Однако следует иметь в виду, что во многих случаях, когда горизонтальные исходные напряжения меньше исходных вертикальных, зоны горизонтальных растягивающих напряжений отсутствуют. В этом случае происходит расслоение пород в зонах вертикальных растягивающих напряжений, деформации от которых локализуются с образованием единственной магистральной трещины расслоения, несмотря на наличие множества мелких и средних трещин. В этом случае отслоившаяся часть кровли опускается как единое целое без значительных нарушений сплошности. Если скважина попадает в этот отделившийся слой (либо в зону выше магистральной трещины), то она сохраняет целостность, хотя опускания этого слоя могут составить 1–1,5–2 м в зависимости от мощности пласта. Магистральная трещина проходит на расстоянии в ~0,5 от вертикального размера зоны вертикальных растягивающих напряжений, что при протяженности выработанного пространства в 200 м составляет примерно 20 м. Т.е. если дегазационная скважина расположена далее 20 м от кровли, то она должна по этому критерию оставаться неразрушенной даже в случае отсутствия магистральной трещины.

Такой механизм деформирования кровли выработанного пространства предполагает наличие достаточно прочной и упругой основной кровли, не допускающей внезапных посадок. Оценка такого поведения массива может быть осуществлена путем численного моделирования развития деформационных процессов с учетом прочностных свойств пород, слагающих массив.

Далее рассматривается вариант, в котором бурение скважин происходит вдоль столба в направлении, противоположном продвижению забоя лавы, т.е. они направлены навстречу друг к другу. Бурение осуществляется по нетронутому массиву на некотором расстоянии от кровли пласта, что не вызывает затруднений с точки зрения устойчивости и сохранности контура проходимой скважины.

Современные технологии позволяют пройти скважину длиной 700–800 м, в то время как длина столба составляет 1,5–2 км. Фактически бурение скважин и продвижение забоя осуществляются одновременно (хотя и не обязательно в силу тех или иных технологических причин), и практически до момента встречи забоя скважины и забоя лавы на некоторой вертикальной плоскости их взаимное влияние отсутствует. На части столба, где пройдена скважина, но еще не ведутся очистные работы, она работает как обычная дегазационная скважина, но пройденная в неразгруженной породе с соответствующими фильтрационно-сорбционными свойствами. Что касается остальной, уже отработанной части столба, то там еще нет такой скважины, хотя имеется определенная разгрузка массива.

Когда же очистные работы подвигаются под рассматриваемые дегазационные скважины, наступает основной режим их работы, поскольку разгрузка пород междупластья начинает проявляться непосредственно в месте расположения скважины. При этом разгрузка повышает проницаемость массива, и следовательно, увеличивает отток газа как в выработанное пространство, так и в эту дегазационную скважину. В общем случае неизвестно распределение этих потоков, и задача состоит в нахождении влияния скважины (или ряда скважин) на интенсивность выделения газа.

Закономерности массопереноса в породах кровли

Рассмотрим особенности массопереноса метана в породах кровли пласта, в рассматриваемом случае применения для дегазации углепородного массива горизонтальные скважины, расположенные в налегающих породах угольного пласта на некотором расстоянии от его кровли. Следует выделить два возможных варианта: когда скважина располагается над участком еще не отработанного пласта, и когда скважина находится над выработанным пространством.

Первый вариант реализуется, когда фронт очистных работ еще не подошел к рассматриваемому участку скважины, заранее пройденной в массиве. В этом случае можно полагать, что скважина со всех сторон окружена неограниченным массивом, хотя и неоднородным как по деформационно-прочностным параметрам, так и по газонасыщенности, ввиду того, что на некотором расстоянии вниз от нее расположен угольный пласт с относительно бóльшим содержанием метана, чем в породах междупластья. Такая ситуация предопределяет направление фильтрационного потока метана из всего массива в скважину. Решение задачи в такой постановке тождественно решению для бесконечной однородной среды, и оно справедливо до тех пор, пока фронт зоны дегазации, представляющий собой цилиндрическую поверхность, не подойдет к кровле пласта. Исходя из значений параметров насыщенности метаном и проницаемости пород междупластья, по которым происходит фильтрация в это время, промежуток такого режима фильтрации может составлять многие годы с весьма незначительным дебитом газа.

Отметим, что в отличие от угольного пласта, где основная часть метана содержится в угольном веществе в сорбированном состоянии (70–80%), в поро-

дах междупластья можно полагать, что сорбированный газ отсутствует. Его количество определяется содержанием в породах угольного вещества, оказавшегося в них в процессе формирования угленосной толщи. В связи с этим далее будем считать, что метан в породах содержится только в свободном состоянии в порах пород. Тем не менее, ввиду значительных объемов вмещающих пород общее количество метана в них достаточно велико.

Другой вариант реализуется, когда под скважиной находится выработанное пространство, в котором отсутствует уголь (как часть массива), а газовое давление составляет практически 0,1 МПа, т.е. атмосферное. Газовые потоки в этом случае отличны от рассмотренных выше. При этом часть газа направляется по-прежнему в скважину, а часть непосредственно в выработанное пространство.

Определенную особенность в происходящие процессы вносит тот факт, что в кровле выработанного пространства всегда формируется зона растягивающих вертикальных напряжений, приводящих к разрыхлению массива в кровле, или даже расслоению. Следствием этого является значительное (на порядки) увеличение проницаемости пород кровли. Размер этой зоны в вертикальном направлении может составлять десятки метров в зависимости от протяженности выработанного пространства и мощности пласта [10]. Если скважина попадает в подобного рода зону, то ее дебит возрастает на порядки, и время дегазации части прилегающего массива уменьшается.

Помимо этого, возрастает массоперенос непосредственно в выработанное пространство. Ввиду того, что поверхности, через которые выходит газ в скважину и в выработанное пространство, несоизмеримы между собой по площади, то подавляющее количество

газа выходит из массива именно через кровлю.

Поскольку зона повышенной проницаемости имеет некоторый определенный размер вглубь массива от кровли, то интенсивный выход газа ограничен этой зоной, и может привести к ее практически полной дегазации в течение нескольких суток. При этом из зоны с малой проницаемостью будет осуществляться незначительный приток газа в дегазированную область и в скважину.

Отметим, что рассмотренные два режима дегазации разделяет переходный режим, реализующийся в области вблизи фронта очистных работ, когда фильтрационные потоки становятся существенно трехмерными, и их моделирование значительно усложняется.

Таким образом, режим работы скважины будет следующим: сначала малый дебит, обусловленный малой проницаемостью пород междупластья, затем постепенное нарастание дебита в переходный период, связанное с увеличением проницаемости с выходом на максимальные значения, и, наконец, падение дебита, обусловленного истощением зоны повышенной проницаемости с выходом на дебиты, сравнимые с начальными.

Постановка задачи фильтрации

Далее рассмотрим более подробно некоторые результаты, относящиеся к периоду времени, когда скважина располагается над выработанным пространством. При этом приведенные результаты будут относиться к трем вариантам постановки задачи. Первый вариант иллюстрирует рис. 4, а, на котором показано вертикальное сечение расчетной области (параллелепипед с размерами 25×25×10 м) и горизонтальная скважина на расстоянии 5 м от кровли выработанного пространства.

При этом вертикальные границы расчетной области (в-в) отнесены на значи-

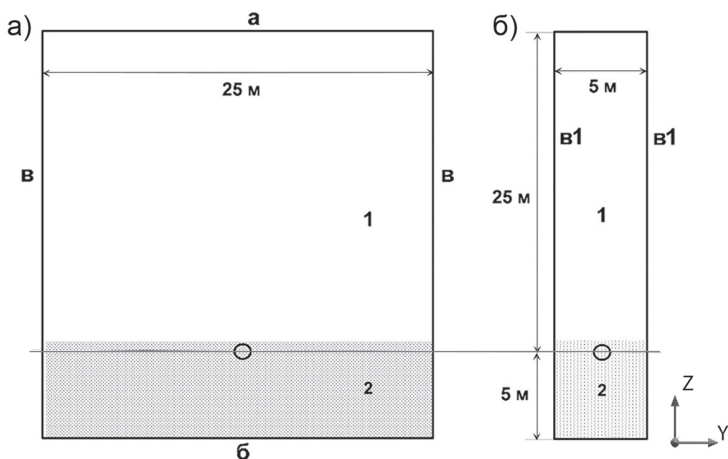


Рис. 4. Вертикальные сечения расчетной области при моделировании массопереноса в углепородной толще

Fig. 4. Calculated area vertical cross sections when modeling mass transfer in a coal-rock massif

тельное расстояние (более 10 м) от расположения скважины, и на них заданы условия непротекания, тем самым моделируются условия бесконечной удаленности этих границ. Т.е. это вариант дегазации углепородного массива посредством одной скважины. Во втором варианте (рис. 4, б) вертикальные границы ($v1-v1$) разнесены на расстояние 5 м, и на них задана симметрия относительно плоскостей, определяемых этими границами (расчетная область — параллелепипед с размерами $5 \times 25 \times 10$ м). В итоге это эквивалентно наличию в массиве множества параллельных скважин, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга, и на расстоянии 5 м от кровли. В третьем варианте, который основан на первом, скважина вообще отсутствует, т.е. дегазация идет исключительно через кровлю выработанного пространства. Сопоставление результатов всех этих вариантов позволяет выявить роль скважин в процессе дегазации для приведенной конфигурации выработки и скважин. Нижние границы расчетной области (б) — это кровля выработанного пространства, через которую поток газа не ограничен. Все представ-

ленные варианты граничных условий обеспечивают постановки упомянутых задач и реализуются в 3D постановке, т.е. расчетная область представляет собой параллелепипед, о двух вертикальных гранях которого речь шла выше. Нижняя грань параллелепипеда — это либо граница пласта и налегающих пород (этот вариант в дальнейшем рассматривать не будем), либо свободная поверхность выработанного пространства. В расчетах на ней реализуется возможность свободного прохождения газа как в одну сторону, так и в другую, в зависимости от создающихся условий.

Что касается верхней грани (а), то она отнесена достаточно далеко в массив и считается непроницаемой стенкой, поскольку за времена фильтрации, фигурирующие в расчетах, фронт дегазации еще не достигает этой грани, и она не принимает участие в фильтрационных процессах.

На двух оставшихся вертикальных гранях (лицевая и задняя грани параллелепипеда), которые перпендикулярно секут скважину, заданы условия симметрии, что фактически удлиняет скважину до бесконечности, при этом в полной

мере реализуется 3D постановка задачи, но при плоскопараллельном газовом потоке.

Отметим, что на рисунках цифрой 1 отмечена область на расстоянии более 5 м от кровли, в которой сохраняется исходное состояние массива по насыщенности газами и проницаемости, в ней проницаемость составляет 10^{-18} м^2 , т.е. 10^{-3} мД. Зоны, отмеченные цифрой 2 и расположенные непосредственно в кровле от 0 м до 5 м, характеризуются проницаемостью в 10^{-16} м^2 , т.е. 10^{-1} мД, давление же переменное, что связано с фильтрацией. Изначально во всем массиве давление было принято равным 5 МПа.

Обсуждение результатов расчета

На рис. 5 показано распределение давления в углепородном массиве на некоторые выбранные моменты времени (1, 5, 24, 48, 168 ч) с момента начала фильтрации, по вертикальной прямой, проходящей через центр скважины для вариантов с одной скважиной (рис. 5, а) и многими (рис. 5, б).

Отметим следующее обстоятельство, связанное с динамикой образования выработанного пространства. Приведенная постановка задачи предполагает наличие фильтрационных потоков газа в рамках плоской задачи при мгновенном формировании кровли выработанного пространства. Хотя очевидно, что ввиду достаточно малой скорости подвигания забоя лавы вблизи последнего картина деформирования существенно не плоская, в связи с чем кривые для 1 и 5 ч, показанные на рис. 5, а не соответствуют в полной мере действительности. Для больших времен (24, 48, 168 ч) фильтрационный поток постепенно переходит в режим плоского потока, и соответствующие кривые можно считать верными. Для 1 и 5 ч должна быть поставлена и решена задача о переходном периоде, которая, видимо, не внесет существенных корректив в окончательный результат, хотя изменит направления потоков вблизи плоскости забоя.

Ясно, что зона $0 < z < 5$ м имеет проницаемость на два порядка большую, чем весь углепородный массив до нача-

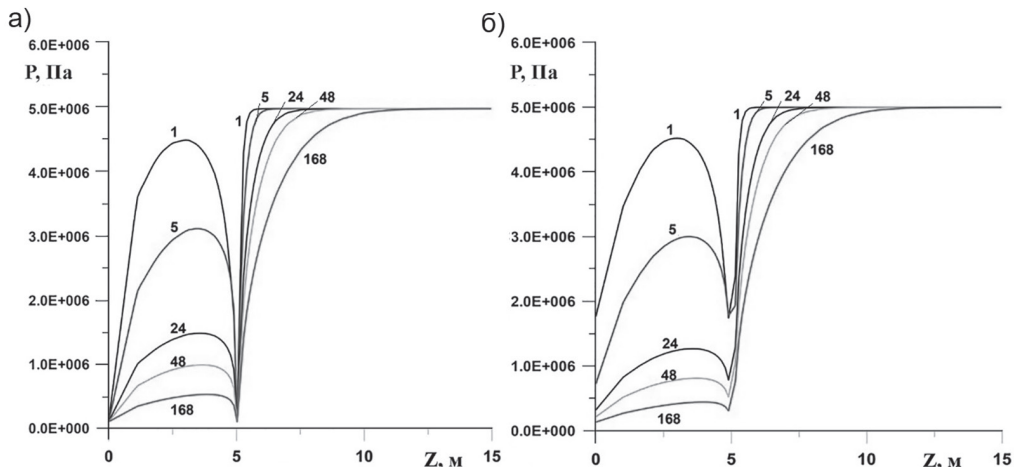


Рис. 5. Распределение давления в углепородном массиве на некоторые выбранные моменты времени (1, 5, 24, 48, 168 ч) с момента начала фильтрации, по вертикальной прямой, проходящей через центр скважины: для одной скважины (а); для серии скважин с интервалом 5 м (б)

Fig. 5. Pressure distribution in coal-rock massif for some selected time periods (1, 5, 24, 48, 168 hours) from the moment of the beginning of filtration, along vertical line passing through the center of the well: for one well (a); for a series of wells with an interval of 5 m (b)

ла формирования выработанного пространства. Вообще говоря, это варьируемый параметр, который должен рассчитываться исходя из степени разгрузки массива кровли. Варьируя его в серии расчетов, можно получить зависимость скорости дегазации этой области в различных горнотехнических условиях.

На рис. 5, б те же результаты показаны для второго варианта (рис. 4, б), когда дегазация осуществляется множеством скважин. При наложении этих рисунков наблюдается практически полное совпадение кривых, что свидетельствует об отсутствии взаимного влияния дегазационных скважин, расположенных на выбранном расстоянии (5 м).

Анализ кривых свидетельствует о достаточно быстрой потере газа этой областью, за 7 сут область практически полностью дегазировалась, в то время как область с малой проницаемостью дегазируется медленнее. Такой быстрый темп дегазации следует связать с отсутствием в массиве сорбированного газа.

На рис. 6 приведены распределение модуля скорости фильтрации V по той

же прямой для момента времени 168 ч (см. рис. 6, а), и серия кривых для разных моментов времени, но только на отрезке $0 < z < 5$ м. Видно, что поток газа направлен как к скважине, так и к поверхности кровли. При этом на всех кривых рис. 6, б имеется точка касания ими оси z , точка смены направления потока газа. По мере истощения этой области скорость фильтрации падает, а точка смены направления приближается к скважине.

Легко вычислить выход газа по времени как через кровлю, так и в скважину. Для этого нужно вычислить интегралы по поверхности кровли и скважины как функцию времени, для чего используется величина массового потока $M(t)$ в каждой точке, равная произведению плотности ρ на скорость V

$$M(t) = \int_S \rho(t)V(t)ds .$$

Сделав достаточно правдоподобные допущения о том, что вокруг скважины в непосредственной окрестности поток газа радиален, а вблизи кровли направлен по нормали к ней, можно получить

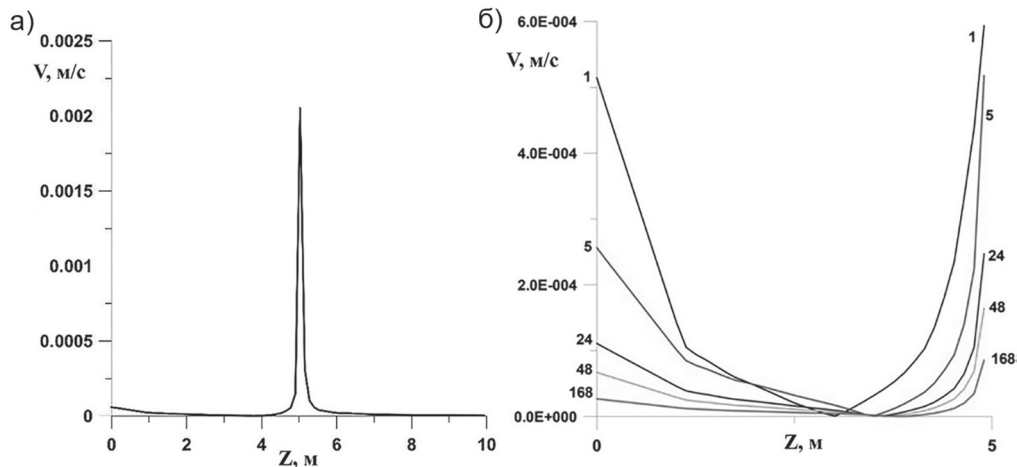


Рис. 6. Распределение модуля скорости фильтрации V по вертикальной прямой, проходящей через центр скважины для момента времени 168 ч (а), и серия кривых для разных моментов времени, но только на отрезке $0 < z < 5$ м (б)

Fig. 6. Distribution of the filtration rate modulus V along a vertical straight line passing through the center of the well for a time of 168 hours (a), and a series of curves for different time points, but only on the segment $0 < z < 5$ м (b)

оценку выхода газа через эти поверхности. Проведенные расчеты для рассматриваемого примера дают величины массового потока газа через упомянутые поверхности в момент времени (речь идет о выходе с 1 м^2 поверхности кровли и погонного метра скважины): $t = 1 \text{ ч}$, $M_{\text{крпл}} = 1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{мин}$, $M_{\text{скв}} = 1 = 0,23 \text{ м}^3/\text{мин}$. При $t = 24 \text{ ч}$ $M_{\text{крпл}} = 24 = 0,01 \text{ м}^3/\text{мин}$, $M_{\text{скв}} = 24 = 0,076 \text{ м}^3/\text{мин}$.

При этом расчет полного выхода газа за весь период дегазации (от 0 до t) связан с необходимостью интегрирования по времени величины $M(t)$:

$$M_z(t) = \int_0^t M(\tau) d\tau.$$

Представляет несомненный интерес оценка эффективности собственно дегазационной скважины в рассматриваемой горнотехнической ситуации, т.е. оценка ее дебитов на различных этапах дегазации углепородного массива. На рис. 5 сопоставлены кривые давления для распределения давления в массиве на разные моменты времени для двух вариантов, а также без скважины. При $t = 1 \text{ ч}$ первые два варианта, как это уже отмечалось выше, фактически совпадают, а третий вариант — без скважины — на ранних стадиях фильтрации имеет отличие в области скважины. Там нет падения давления, как в первых двух вариантах, однако уже в достаточной близости давление для всех трех вариантов сравнивается. Со стороны массива зона влияния скважины составляет не более $0,1 \text{ м}$, а со стороны кровли выработанного пространства $\sim 2 \text{ м}$.

Что касается $t = 168 \text{ ч}$, то дегазация зоны $0 < z < 5 \text{ м}$ идет медленнее без скважины в силу отсутствия оттока газа в нее. Однако дегазация малопроницаемой зоны $z > 5 \text{ м}$ практически не зависит от наличия скважины в кровле выработанного пространства (все три кривых давления совпадают), а зона влияния распространяется на 5 м и более.

Отметим, что все полученные результаты количественно характеризуют протекание процессов только для фактически выбранных параметров и демонстрируют в основном качественные зависимости, которые могут реализовываться *in situ*.

Заключение

Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния пород кровли выработанного пространства при отработке угольного пласта и особенностей массопереноса метана с учетом дегазационной скважины, расположенной в кровле, позволил установить следующее.

Определяющим моментом для происходящих в кровле газодинамических процессов является перераспределение напряжений в массиве вследствие развития горных работ по извлечению угля из пласта. Увеличение объемов создаваемых пустот приводит к возникновению обширных зон пригрузки и разгрузки с изменением фильтрационных параметров. Непосредственно над выработанным пространством формируется зона с повышенной проницаемостью, способствующая быстрой практически полной дегазации части массива. Если дегазационная скважина попадает в эту зону, то она воспринимает часть потока метана и отводит его в дегазационную систему. Если же она пройдена выше этой зоны повышенной проницаемости, то она фактически не играет никакой существенной роли в отводе метана из массива.

Оценка эффективности дегазационной скважины показывает, что выход газа с каждого погонного метра скважины сопоставим с выходом газа с каждого квадратного метра кровли выработанного пространства. Таким образом, для конкурентной дегазации углепородного массива с помощью скважин их

количество в кровле должно быть достаточно велико.

При этом отметим, что для принятых условий задачи, при расстоянии между параллельными скважинами в 5 м и более, в течение длительного периода времени они функционируют независимо друг от друга, как одиночные скважины, т.е. зоны дегазации в массиве не перекрываются.

Кроме того, заметим, что дегазация массива в кровле пласта в рассматриваемом

случае фактически сводится к удалению метана из зоны разгрузки с повышенными значениями проницаемости, поскольку миграция в нетронутом породном массиве минимальна. Однако возможна ситуация, когда обрабатываемые смежные пласты и породы междупластья изначально частично разгружены обработкой сближенного пласта. В этом случае постановка задачи практически не изменяется, но результаты будут отличными от изложенного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yang J. H., Yao C., Jiang Q. H., Lu W. B., Jiang S. H.* 2D numerical analysis of rock damage induced by dynamic in-situ stress redistribution and blast loading in underground blasting excavation // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 221 – 232. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.007.

2. *Lubosik Z., Waclawik P., Horak P., Wrana A.* The influence of in-situ rock mass stress conditions on deformation and load of gateroad supports in hard coal mine // *Procedia Engineering*. 2017, vol. 191, pp. 975 – 983. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.269.

3. *Игнатов Е. В.* Зависимости и особенности смещений и формирования зон разрушения кровли и краевой части пласта при взаимодействии с элементной базой бесцеликовой технологии // *Техника и технология горного дела*. – 2020. – № 4. – С. 4–41. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-4-4-41.

4. *Шванкин М. В., Бондарев А. В.* Особенности обработки удароопасных пластов в условиях труднообрушаемых кровель // *Вестник Научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности*. – 2019. – № 2. – С. 81 – 88. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.10.2.010.

5. *Семенцов В. В., Осминин Д. В., Нифанов Е. В.* Устойчивость выемочных горных выработок при обработке пластов с труднообрушающимися кровлями // *Вестник Научного центра ВОСТНИИ по промышленной и экологической безопасности*. – 2021. – № 3. – С. 14–25. DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.47.12.002.

6. *Трофимов В. А., Шиповский И. Е.* Триггерный характер потери прочности и разрушения кровли выработки в горном массиве при изменении свойств породы / *Актуальные вопросы прочности: Сборник материалов LXIV Международной конференции*. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2022. – 401 с.

7. *Трофимов В. А., Филиппов Ю. А.* Особенности формирования массопереноса метана в породах междупластья // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2021. – № 3. – С. 71 – 78. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-3(123)-71-78.

8. *Кузнецов С. В.* Общие наблюдения и характерные особенности перераспределения в массивах горных пород при развитии выработанного пространства // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1988. – № 6. – С. 3–16.

9. *Trubetskoi K. N., Kuznetsov S. V., Trofimov V. A.* Stress state and failure of seam contacts with enclosing rocks in driving stope // *Journal of Mining Science*. 2001, vol. 37, no. 4, pp. 345 – 353.

10. *Kuznetsov S. V., Trofimov V. A.* Deformation of a rock mass during excavation of a flat sheet-like hard mineral deposit // *Journal of Mining Science*. 2007, vol. 43, no. 4, pp. 341 – 360.

11. Sa A., Ep A., Zheng S. B. A review of transport mechanisms and models for un-conventional tight shale gas reservoir systems // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021, vol. 175, article 121125.
12. Li Y., You X., Zhao J., Zhang X. Production forecast of a multistage fractured horizontal well by an analytical method in shale gas reservoir // *Environmental Earth Sciences*. 2019, vol. 78, no. 9, pp. 2721 – 2720.
13. Cong X. A., Leng T. B. Modelling of fractured horizontal wells with complex fracture network in natural gas hydrate reservoirs // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, vol. 45, no. 28, pp. 14266 – 14280.
14. Dongxu Z., Liehui Z., Huiying T., Yulong Z. Fully coupled fluid-solid productivity numerical simulation of multistage fractured horizontal well in tight oil reservoirs // *Petroleum Exploration and Development*. 2021, vol. 49, no. 2, pp. 1 – 10.
15. Li N., Fang L., Sun W., Zhang X., Chen D. Evaluation of Borehole hydraulic fracturing in coal seam using the microseismic monitoring method // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 2, pp. 607 – 625.
16. Hosseini N., Khoei A. R. Modeling fluid flow in fractured porous media with the interfacial conditions between porous medium and fracture // *Transport in Porous Media*. 2021, vol. 139, no. 1, pp. 109 – 129.
17. Cai H., Li P., Feng M., Hao Y., Lu D. A fully mass conservative numerical method for multiphase flow in fractured porous reservoirs // *Transport in Porous Media*. 2021, vol. 139, pp. 171 – 184.
18. Liu K., Yin D., Sun Y. The mathematical model of stress sensitivities on tight reservoirs of different sedimentary rocks and its application // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020, vol. 193, article 107372.
19. Zafar A., Su Y. L., Li L., Fu J., Mehmood A. Tight gas production model considering TPG as a function of pore pressure, permeability and water saturation // *Petroleum Science*. 2020, vol. 17, no. 5, pp. 1356 – 1369.
20. Zhong X., Zhu Y., Liu L., Yang H., Li Y., Xie Y., Liu L. The characteristics and influencing factors of permeability stress sensitivity of tight sandstone reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020, vol. 191, article 107221.
21. Захаров В. Н., Шляпин А. В., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Изменение напряженно-деформированного состояния углепородного массива при отработке угольного пласта // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 9. — С. 5 – 24. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-5-24. **PLoS**

REFERENCES

1. Yang J. H., Yao C., Jiang Q. H., Lu W. B., Jiang S. H. 2D numerical analysis of rock damage induced by dynamic in-situ stress redistribution and blast loading in underground blasting excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 221 – 232. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.007.
2. Lubosik Z., Waclawik P., Horak P., Wrana A. The influence of in-situ rock mass stress conditions on deformation and load of gateroad supports in hard coal mine. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 191, pp. 975 – 983. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.269.
3. Ignatov E. V. Dependencies and features of displacements and formation of destruction zones of the roof and the edge part of the reservoir when interacting with the element base of pillarless technology. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2020, no. 4, pp. 4 – 41. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-4-4-41.
4. Shvankin M. V., Bondarev A. V. Peculiarities of working out shock-hazardous seams in conditions of hard-to-cave roofs. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety*. 2019, no. 2, pp. 81 – 88. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.10.2.010.
5. Sementsov V. V., Osminin D. V., Nifanov E. V. Stability of excavation mine workings when mining seams with hard-to-collapse roofs. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII on*

Industrial and Environmental Safety. 2021, no. 3, pp. 14–25. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOST-NII.2021.47.12.002.

6. Trofimov V. A., Shipovskiy I. E. Trigger nature of the loss of strength and destruction of the roof of a working in a rock mass when the properties of the rock change. *Aktual'nye voprosy prochnosti: Sbornik materialov LXIV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Current issues of strength: Collection of materials of the LXIV International Conference], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 401 p. [In Russ].

7. Trofimov V. A., Filippov Yu. A. Peculiarities of the formation of methane mass transfer in the rocks of the interlayer. *Equipment and technologies for oil and gas complex*. 2021, no. 3, pp. 71–78. [In Russ]. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-3(123)-71-78.

8. Kuznetsov S. V. General observations and characteristic features of redistribution in rock masses during the development of mined-out space. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1988, no. 6, pp. 3–16. [In Russ].

9. Trubetskoi K. N., Kuznetsov S. V., Trofimov V. A. Stress state and failure of seam contacts with enclosing rocks in driving stope. *Journal of Mining Science*. 2001, vol. 37, no. 4, pp. 345–353.

10. Kuznetsov S. V., Trofimov V. A. Deformation of a rock mass during excavation of a flat sheet-like hard mineral deposit. *Journal of Mining Science*. 2007, vol. 43, no. 4, pp. 341–360.

11. Sa A., Ep A., Zheng S. B. A review of transport mechanisms and models for un-conventional tight shale gas reservoir systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021, vol. 175, article 121125.

12. Li Y., You X., Zhao J., Zhang X. Production forecast of a multistage fractured horizontal well by an analytical method in shale gas reservoir. *Environmental Earth Sciences*. 2019, vol. 78, no. 9, pp. 2721–27220.

13. Cong X. A., Leng T. B. Modelling of fractured horizontal wells with complex fracture network in natural gas hydrate reservoirs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, vol. 45, no. 28, pp. 14266–14280.

14. Dongxu Z., Liehui Z., Huiying T., Yulong Z. Fully coupled fluid-solid productivity numerical simulation of multistage fractured horizontal well in tight oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*. 2021, vol. 49, no. 2, pp. 1–10.

15. Li N., Fang L., Sun W., Zhang X., Chen D. Evaluation of Borehole hydraulic fracturing in coal seam using the microseismic monitoring method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 2, pp. 607–625.

16. Hosseini N., Khoei A. R. Modeling fluid flow in fractured porous media with the interfacial conditions between porous medium and fracture. *Transport in Porous Media*. 2021, vol. 139, no. 1, pp. 109–129.

17. Cai H., Li P., Feng M., Hao Y., Lu D. A fully mass conservative numerical method for multiphase flow in fractured porous reservoirs. *Transport in Porous Media*. 2021, vol. 139, pp. 171–184.

18. Liu K., Yin D., Sun Y. The mathematical model of stress sensitivities on tight reservoirs of different sedimentary rocks and its application. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020, vol. 193, article 107372.

19. Zafar A., Su Y. L., Li L., Fu J., Mehmood A. Tight gas production model considering TPG as a function of pore pressure, permeability and water saturation. *Petroleum Science*. 2020, vol. 17, no. 5, pp. 1356–1369.

20. Zhong X., Zhu Y., Liu L., Yang H., Li Y., Xie Y., Liu L. The characteristics and influencing factors of permeability stress sensitivity of tight sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020, vol. 191, article 107221.

21. Zakharov V. N., Shlyapin A. V., Trofimov V. A., Filippov Yu. A. Change in stress-strain behavior of coal-rock mass during coal mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 5–24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-5-24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Захаров Валерий Николаевич*¹ — академик РАН,
директор, e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9309-2391,

*Трофимов Виталий Александрович*¹ — д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: asas_2001@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9010-189X,

*Филиппов Юрий Алексеевич*¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: filippov.yury@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-3347-677X,

*Шляпин Алексей Владимирович*¹ — канд. техн. наук,
заместитель директора по научной работе,
e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9442-0983,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Шляпин А.В., e-mail: Shlyapin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.N. Zakharov*¹, Academician
of Russian Academy of Sciences,
Director, e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9309-2391,

*V.A. Trofimov*¹, Dr. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory,
e-mail: asas_2001@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9010-189X,

*Yu.A. Filippov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
e-mail: filippov.yury@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-3347-677X,

*A.V. Shlyapin*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Deputy Director for Science,
e-mail: Shlyapin@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9442-0983,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.V. Shlyapin, e-mail: Shlyapin@mail.ru.

Получена редакцией 14.09.2022; получена после рецензии 03.10.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 14.09.2022; received after the review 03.10.2022; accepted for printing 10.10.2022.

