

Научная статья

УДК 622.453; 622.411.33; 622.831

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-124-133

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ ДЕГАЗАЦИИ**Ли Константин Хиунович¹, Фомин Анатолий Иосифович²¹ Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* e-mail: fominai@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

17 ноября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к публикации:

11 июня 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

Ключевые слова:

моделирование, угольный
пласт, дегазация, фильтрация,
сорбционное давление,
пластовое давление,
напряженное состояние,
пьезопроводность массива

Аннотация.

В данной статье авторами рассмотрены варианты механического и газодинамического взаимодействия дегазационной скважины с массивом угля. Моделирование фильтрации газа по пространству газонаполненного угольного месторождения у концентраторов напряжений осуществляется на феноменологических физико-механических представлениях о структуре массива. Газоносный массив рассмотрен как некая сплошная среда с равномерными или частично равномерными распределенными механическими и газодинамическими свойствами. Предложены критерии для оценки протяженности зон влияния скважины на угольный массив. Из естественного состояния системы скважина-массив выделены и изучены эффекты влияния скважины для случаев природного состояния массива без газа, газонаполненного массива до начала и в процессе его дегазации. Численное моделирование механического и газодинамического взаимодействия массива и скважины показывает зависимость зоны влияния скважины на массив от времени дегазации. При этом протяженность границы зоны влияния при дегазации массива в течение 180 суток составляет 3.6 диаметра скважины, в то время как до начала дегазации протяженность зоны влияния составляет 1.4 диаметра скважины. Проведенным научным исследованием установлено, что увеличение напряженного состояния массива у скважины из-за уменьшения поддерживающего эффекта пластового давления газа является одной из причин увеличения зоны влияния скважины на массив угля во времени. Предложенное авторами математическое моделирование физического состояния угольного пласта вокруг горной выработки при дегазации позволяет проводить оперативно многовариантные численные исследования изменяющихся во времени профилей пластового давления газа и напряжений в возмущенном конструктивными элементами газоносном угольном массиве. Вследствие разнообразия механических, газодинамических и геометрических параметров скважины и угольного массива проведенные исследования указывают на необходимость решения многопараметрической задачи о влиянии дегазационной скважины на угольнопородный массив.

Для цитирования: Ли К.Х., Фомин А.И. Математическое моделирование физического состояния угольного пласта вокруг горной выработки при дегазации // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 124-133. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-124-133, EDN: PCXRIE

Методика и модель моделирования дегазации газонаполненного угольного месторождения у концентраторов напряжений в своей основе следуют феноменологическим физико-механическим представлениям о структуре массива [1–7]. При этом газонасыщенный массив характеризуется как некая сплошная среда с равномерными или частично равномерными распределенными механическими и газодинамическими свойствами [8–19].

Известно, что при выборе варианта эффективного активного комбинированного способа дегазации угольных месторождений, планирования и устройства скважин, помимо руководящих документов, интуитивных предположений, производственного опыта изначально оказывается необходимым знание о геомеханических и газодинамических процессах, происходящих в угольном массиве, в зоне предполагаемого расположения дегазационных скважин. С другой стороны, оказывается не менее важным изучение отклика массива на само присутствие скважин.

При этом одной из важнейших технологических задач при дегазации угольного пласта является изучение областей влияния скважины на массив угля, их облика и протяженности, включающее:

- изучение зон влияния скважины на угольный массив без газа;
- изучение зон влияния скважины на газонаполненный угольный массив до его дегазации;
- изучение зон влияния скважины на угольный массив в процессе его дегазации.

Оценка состояния газонаполненного массива угля у скважин как исходного, начального его состояния ($t = 0$, где t – время дегазации) может быть получена с использованием аналитических методов анализа.

Критерием оценки зоны влияния скважины на механическое состояние массива угля у скважины могут служить значения тангенциальных

(окружных) напряжений σ_θ (полярная система координат) при действии на угольный пласт гравитационной составляющей горного давления и бокового распора. В такой постановке тангенциальные напряжения могут быть получены суперпозицией решений задачи о растяжении пластины с отверстием [20, 21] (задача Кирша) для случаев ее нагружения на бесконечности величиной гравитационного давления и бокового распора. С учетом действия пластового давления газа придем:

$$\sigma_\theta = Ps - \gamma H \left[\frac{1 + \lambda}{2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{1 - \lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_0^2}{r^4} \right) \cos 2\theta \right], \quad (1)$$

Ps – сорбционное давление газа в пласте угля; H – глубина залегания пласта; γ – средний удельный

вес вышележащих от пласта угля горных пород; λ – коэффициент бокового распора; r_0, r, θ – геометрические параметры задачи, Рис. 1.

Полагая в зависимости (1) $r \rightarrow \infty$ для

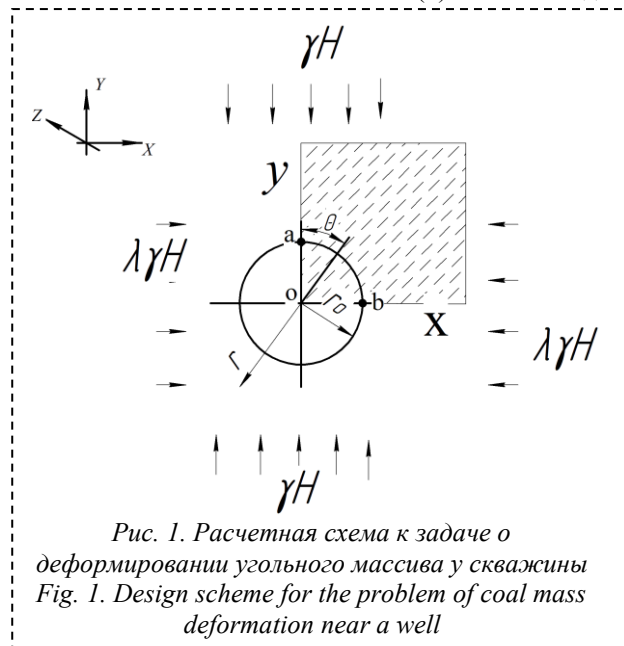


Рис. 1. Расчетная схема к задаче о деформировании угольного массива у скважины
Fig. 1. Design scheme for the problem of coal mass deformation near a well

начального состояния напряжений в угольном массиве, получим:

$$\sigma_\theta^H = Ps - \gamma H \left(\frac{1 + \lambda}{2} - \frac{1 - \lambda}{2} \cos 2\theta \right). \quad (2)$$

Вместе с тем анализ распределения напряжений (1) в массиве угля у скважины показывает, что граница влияния скважины распространяется на расстояния до $r \rightarrow \infty$, что нереально. Имея в виду известный принцип Барре Сен-Венана, будем полагать, что влияние скважины на массив угля носит локальный характер и по мере удаления от скважины напряжения в массиве стремятся к своему естественному начальному напряженному состоянию.

Погрешность между действующими напряжениями (1) и (2) запишем в виде:

$$\Delta = \frac{\sigma_\theta - \sigma_\theta^H}{\gamma H}. \quad (3)$$

Подставив выражение (1) и (2) в условие (3), радиус влияния скважины на угольный массив $r = R_\Delta$ с точностью до величины (3) получим в виде:

$$\Delta \cdot R_\Delta^4 - a \cdot R_\Delta^2 + b = 0,$$

$$a = \frac{1 + \lambda}{2} r_0^2; \quad b = \frac{1 - \lambda}{2} \cdot 3 \cdot r_0^4 \cdot \cos 2\theta$$

где Решая биквадратное уравнение и выбирая из четырех корней максимальное значение, получим:

$$R_{\Delta} = r_0 \sqrt{\frac{1+\lambda}{2} + \sqrt{\frac{(1+\lambda)^2}{4} - 6(1-\lambda)\Delta \cos 2\theta}} \quad (4)$$

В качестве примера оценки размеров зоны влияния скважины на угольный массив по параметру (4) рассмотрим следующие геолого-промысловые свойства пласта: глубина залегания $H = 400$ м.; $P_S = 3.45$ МПа; $\gamma H = 10.0$ МПа; $\lambda = 0,43$; диаметр скважины $d = 0,15$ м.

Результаты расчетов зоны влияния скважины и ее размеры для случая $\Delta = 10\%$, полученные по зависимости (4), представлены на Рис. 2.

Исследования зоны влияния скважины на угольный массив в исходном, начальном его состоянии ($t = 0$, где t – время дегазации) показывают следующее:

- протяженность и конфигурация зоны влияния скважины на угольный массив не зависят от глубины залегания пласта;

- как для массива угля без газа, так и для газонаполненного массива вне зависимости от уровня сорбционного давления газа размеры и конфигурация зон влияния скважины на массив совпадают;

- наибольший размер зоны влияния скважины простирается вдоль горизонтальной оси пласта (ось OX , $\theta = \pi/2$, Рис. 1);

- протяженность зоны влияния скважины зависит от величины бокового распора;

- на практике при экспертных оценках размеров зоны влияния скважины как на газонаполненный, так и на полностью дегазированный угольные массивы может быть использован единый максимальный радиус

влияния R_{Δ}^{\max} . При этом формула (4) примет вид:

$$R_{\Delta}^{\max} = r_0 \sqrt{\frac{1+\lambda}{2} + \sqrt{\frac{(1+\lambda)^2}{4} + 6(1-\lambda)\Delta}} \quad (5)$$

(5)

Далее рассмотрим влияние скважины на угольный массив в процессе инфильтрации газа из массива во времени.

Примем, что для рассматриваемого месторождения пласт угля мощностью 2 м изотропен. Пласт пологого падения располагается на глубине 400 м. Горизонтальная скважина

радиусом $r_0 = 0.075$ м располагается в вертикальном сечении пласта вдоль оси выемочного столба в его средней по мощности части. Будем полагать, что на рассматриваемую одиночную скважину обнажения и вмещающие породы не оказываются влияние.

В этом случае расчетная схема приемлема для скважины, находящейся в условиях плоской деформации и упругого режима фильтрации газа, Рис. 1.

Геолого-промысловые свойства, используемые при моделировании дегазации пласта, приняты следующими:

$$P_S = 3.45 \text{ МПа}; m = 4\%;$$

$$\gamma H = 10.0 \text{ МПа}; P_1 = 0.8 \text{ МПа};$$

$$a^* = 7.16 \cdot 10^{-9} \frac{M^2}{c}; E = 3665 \text{ МПа};$$

$$\lambda = 0.43; \gamma = 2500 \text{ кг/м}^3;$$

$$\beta = -\frac{1-2\mu}{E} = -\frac{0,4}{3665} = -1,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{МПа}},$$

где P_1 – давление в объеме скважины, E – модуль упругости угля; m – пористость пласта; a^* – коэффициент пьезопроводности угольного

пласта, определяемый как для газовых залежей; β – коэффициент расширения материала угля вследствие действия пластового и сорбционного давлений [5].

Оценку зоны влияния скважины в процессе его дегазации проведем, анализируя изменение вдоль оси OX ($\theta = \pi/2$, Рис. 1) вертикальной составляющей тензора напряжений, для случая величины допустимой погрешности $\Delta = 10\%$, выражение (3).

Вследствие сложности задачи ее решение получим при помощи численного метода анализа – метода конечных

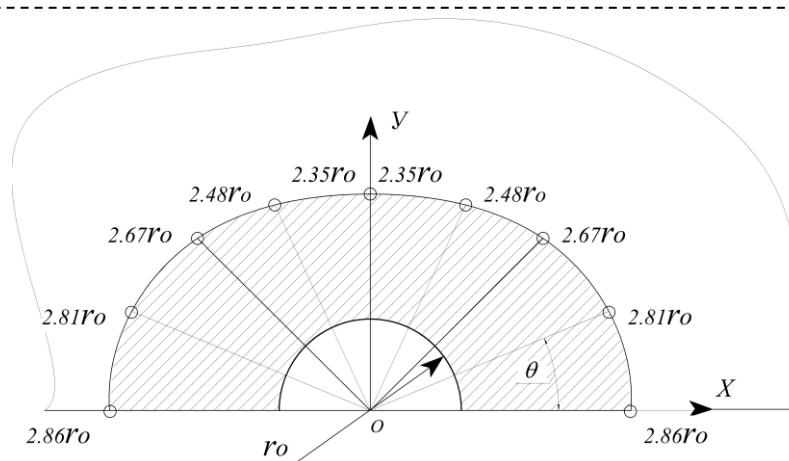


Рис. 2. Зона влияния скважины на массив угля (зона влияния отмечена штриховкой)

Fig. 2. Well influence zone on the coal massif (influence zone is marked with shading)

Таблица 1. Относительные размеры зон влияния скважины на массив угля, определенные по вертикальным напряжениям

Table 1. Relative sizes of the well's influence zones on the coal mass, determined by vertical stresses

t , сутки	0	10	30	50	70	100	180
R_{Δ}/r_0	2.86	4.0	4.5	4.8	5.0	5.1	5.2

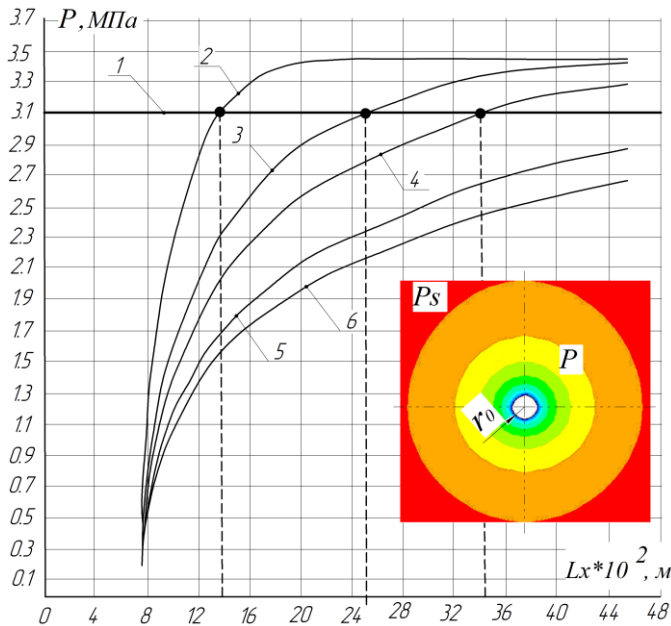


Рис. 3. Изменение пластового давления газа у скважины в зависимости от времени дегазации массива

Fig. 3. Change in reservoir gas pressure at the wellhead depending on the time of massif degassing

Таблица 2. Относительные размеры зон влияния скважины на массив угля по критерию оценки приближения пластового давления к сорбционному давлению газа

Table 2. Relative sizes of the well's influence zones on the coal mass by the criterion of evaluating the approach of the reservoir pressure to the gas sorption pressure

t , сутки	0	1	10	30	50	70	100	180
R_{Δ}/r_0	0	1.9	3.3	4.6	5.5	6.0	6.5	7.2

элементов, реализованного в системе прочностного анализа FIDESYS. Методика решения двуединой задачи – нестационарной фильтрации и расчета напряженного состояния угольнопородного массива – изложена в работе [3].

Анализ зон влияния скважины на массив угля по изменению вертикальных напряжений вдоль горизонтальной оси скважины во времени его дегазации приводит к результатам, представленным в Таблице 1.

Зона влияния скважины увеличивается по сравнению с зоной влияния для полностью дегазированного и газонаполненного массива угля ($t=0$, Рис. 1). При этом влияние скважины на массив увеличивается по мере увеличения времени дегазации. Увеличение напряженного состояния массива у скважины из-за уменьшения поддерживающего эффекта пластового давления газа является одной из причин увеличения зоны влияния скважины на массив угля во времени.

Проведенные исследования зоны влияния дегазационной скважины на угольный массив указывают на существование и необходимость решения многопараметрической задачи.

Одной из таких задач служит задача об оценке изменения размеров зон влияния дегазационной скважины на массив угля во времени, в которой критерием размеров зоны влияния служит сопоставление уровня пластового давления с уровнем сорбционного давления газа.

Решение задачи сводится к оценке границы так называемого обеспеченного питания при $P \rightarrow P_s$, где в процессе дегазации остаются области с естественным газодинамическим состоянием массива, характеризующимся действующим сорбционным давлением газа. В этой связи критерием оценки зон влияния скважины на угольный массив может служить выражение:

$$\Delta = \frac{P_s - P}{P_s} \cdot 100, \% \quad (6)$$

Решая задачу о влиянии скважины на массив с использованием критерия (6), величину допустимой погрешности расчетов между пластовым и сорбционным давлениями $P \rightarrow P_s$ определим величиной $\Delta = 10\%$:

На Рис. 3 представлены результаты численных расчетов изменений пластового давления газа у скважины вдоль оси ОХ, Рис. 1, для различных времен дегазации массива, а также качественная картина линий уровней пластового давления газа в массиве угля для времени дегазации $t = 180$ суток.

На Рис. 3 приняты следующие обозначения: позиция 1 – линия пластового давления газа, ниже на 10% уровня сорбционного давления; 2 – изменение пластового давления в массиве для

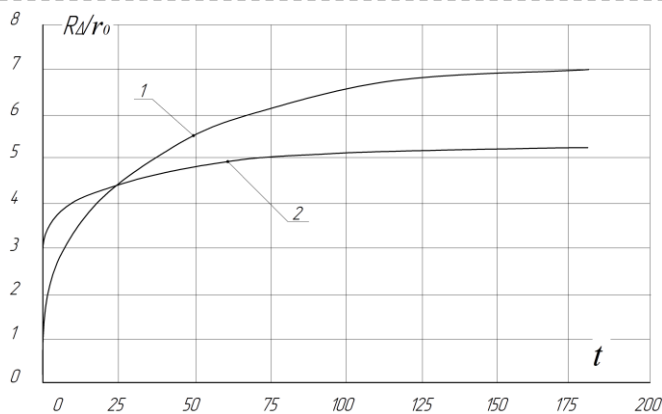


Рис. 4. Изменение относительных размеров зон влияния скважины на угольный массив в зависимости от времени t (сутки) дегазации

- 1 – относительные размеры зоны влияния скважины на массив угля, определенные по критерию (6);
2 – относительные размеры зоны влияния, определенные по критерию (3)

Fig. 4. Change in the relative sizes of the well's influence zones on the coal massif, depending on the degassing time t (days)

- 1 – approximate dimensions of the kitchen well zone on the array of coal fireplaces, stoves according to criterion (6);
2 – relative sizes of the zone of influence, determined by criterion (3)

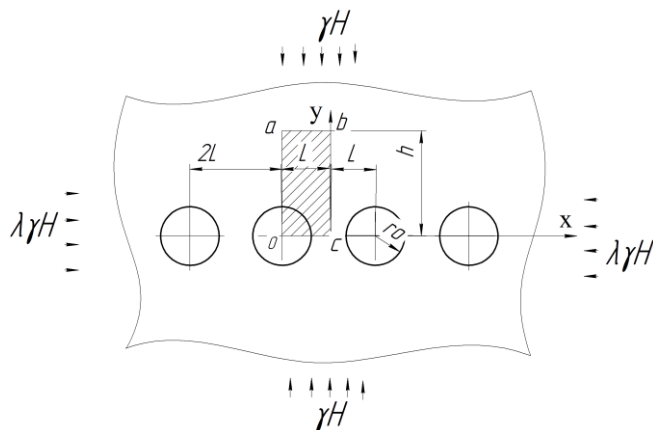


Рис. 5. Схема периодического расположения дегазационных скважин по полигону угольного пласта
Fig. 5. Scheme of the periodic location of degassing wells in the coal seam area

времени дегазации $t = 1$ сутки; 3 – изменение пластового давления газа в массиве через $t = 10$ суток его дегазации; 4 – изменение пластового давления газа в массиве через $t = 30$ суток его дегазации; 5 – изменение пластового давления газа в массиве через $t = 180$ суток его дегазации; 6 – изменение пластового давления газа в массиве через $t = 360$ суток его дегазации.

Оценка зон влияния скважины на массив угля по изменению пластового давления вдоль горизонтальной оси скважины во время дегазации угля с использованием критерия (6) приводит к следующим результатам (Таблица 2).

Сопоставление результатов расчетов размеров зон влияния скважины на массив, определенное по пластовому давлению газа и по вертикальным напряжениям у скважины, показано на Рис. 4.

Анализируя проблему взаимного влияния дегазационной скважины с угольным массивом, обратим внимание на механическое и газодинамическое взаимодействие ряда дегазационных скважин друг с другом.

Рассмотрим периодическое расположение скважин, располагающихся в вертикальном сечении пласта вдоль оси выемочного столба в его средней по мощности части, Рис. 5.

В соответствии с данными Таблицы 1 и Таблицы 2 будем полагать, что на рассматриваемые скважины обнажения и вмещающие породы не оказывает влияние.

В силу симметричного расположения скважин и действующих на пласт нагрузок расчетная схема задачи представима фрагментом «оabc», Рис. 5. В этом случае расчетная схема задачи приемлема для скважин, находящихся в условиях плоской деформации массива угля и упругого режима фильтрации газа. При этом на границах расчетной схемы «оabc» – «oa», «ос» и «bc» задаются условия симметрии – нулевые перемещения по нормали к линиям границы. Размер h расчетной схемы соответствует половине величины мощности пласта. Все остальные исходные данные – условия нагружения, физико-механические и газодинамические параметры угольного массива – заимствуются из предыдущего исследования.

Как и прежде, решения нестационарных задач массопереноса проведем с использованием метода конечных элементов.

В качестве исходного ориентира при исследованиях взаимодействия скважин с окружающим массивом угля примем время дегазации пласта в течение 360-ти суток, полагая, что расстояния между скважинами $2L = 1$ м, Рис. 5.

На Рис. 6 представлен общий вид информационных механических и газодинамических параметров состояния массива угля у скважины на рассматриваемый момент времени.

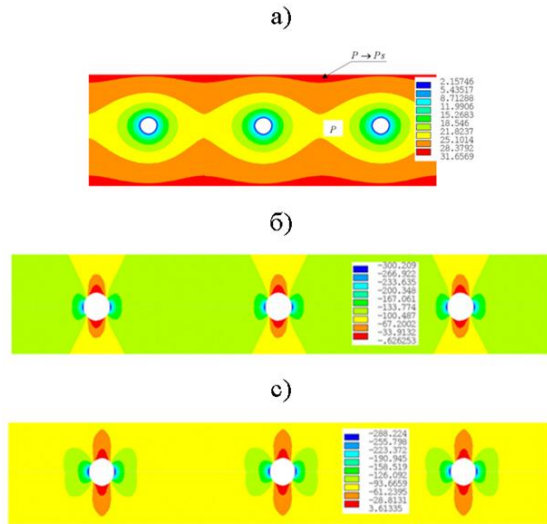


Рис. 6. Линии уровней пластового давления газа, $10 \cdot P$, МПа, а) вертикальных напряжений $10 \cdot \sigma_y$, МПа, в массиве угля без газа б) и с газом с) на расчетный момент времени дегазации

Fig. 6. Lines of gas reservoir pressure levels, $10 \cdot P$, MPa, a) vertical stresses $10 \cdot \sigma_y$, MPa, in a coal mass without gas б) and with gas с) at the calculated time of degassing

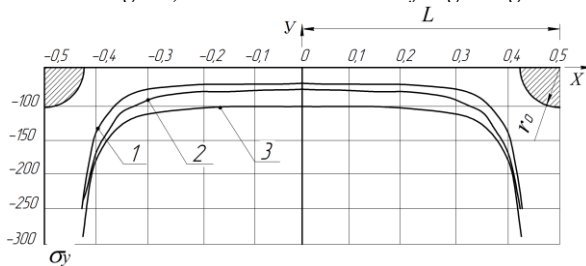


Рис. 7. Вертикальные напряжения $10 \cdot \sigma_y$, МПа, вдоль горизонтальной оси OX между скважинами, Рис. 5 1 – газонаполненный массив; 2 – с учетом дегазации, 360 суток; 3 – массив без газа

Fig. 7. Vertical stresses $10 \cdot \sigma_y$, MPa, along the horizontal axis OX between the wells, Fig. 5 1 – gas-filled massif; 2 – taking into account degassing, 360 days; 3 – massif without gas

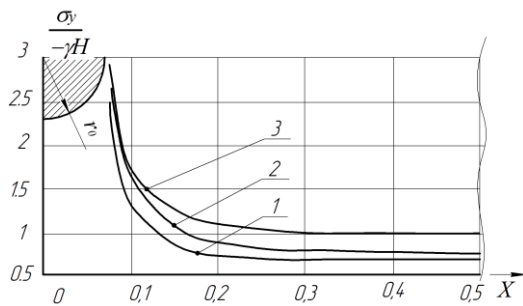


Рис. 8. Концентрация вертикальных напряжений вдоль линии OS , Рис. 5

1 – газонаполненный массив; 2 – с учетом дегазации, 360 суток; 3 – массив без газа

Fig. 8. Concentration of vertical stresses along the OS line, Fig. 5

1 – gas-filled massif; 2 – taking into account degassing, 360 days; 3 – massif without gas

Для более детального анализа на Рис. 7 приведено распределение вертикальных

напряжений в межскважинном пространстве вдоль горизонтальной оси OX , Рис. 5, а также в терминах концентрации вертикальных напряжений, Рис. 8.

Анализ результатов расчетов показывает, что в случае периодического расположения скважин в ряд характер их механического и газодинамического взаимодействия носит локальный характер, в том числе при длительной дегазации массива угля. Влияние скважин на угольный массив при расстояниях между ними, превышающих размеры, показанные в Таблицах 1 и 2, или рассчитанные в соответствии с (5), может оцениваться по зависимостям как для одиночной скважины.

При расчетах условия нагружения физико-механические, газодинамические и геометрические параметры задачи заимствовались из предыдущих исследований.

При расстояниях между скважинами меньшими, чем они рассчитаны по зависимости (5), концентрация напряжений в боках скважины увеличивается, существенно изменяя свое влияние на угольный массив. Рассмотрим взаимодействие скважин с массивом угля в терминах изменений коэффициента концентрации вертикальных напряжений $k_{\sigma} = \sigma_y / (-\gamma H)$ в боках скважины (точка б, Рис. 1) для расстояний между центрами скважин меньшими, чем максимальный радиус влияния (5).

На Рис. 9 представлены результаты расчетов для следующих рассмотренных случаев: угольный массив без газа, позиция 1; с учетом дегазации, 360 суток, позиция 2; газонаполненный массив, позиция 3.

Обобщая исследования о зонах влияния дегазационных скважин на угольный массив с использованием разработанной физико-математической модели, связывающей процессы фильтрации с напряженным состоянием массива во времени, приходим к следующим результатам и выводам.

1. Моделирование фильтрации газа по пространству газонаполненного угольного месторождения у концентраторов напряжений осуществляется на феноменологических физико-механических представлениях о структуре массива. Газоносный массив характеризуется как некая сплошная среда с равномерными или частично равномерными распределенными механическими и газодинамическими свойствами.

2. Формально полагается, что в порах и трещинах угольного пласта в его естественном (природном) состоянии рудничный газ

существует в виде газообразной фазы, характеризуется так называемым сорбционным давлением P_s , формирующимся в течение геологического периода, при котором устанавливается равновесие системы газ-уголь. В результате каптажа рудничного газа в окрестности скважины давление газа становится переменным, уменьшаясь от зоны естественного питания до величины давления в скважине, называемого пластовым P . При этом очевидно, что $P \leq P_s$.

3. Математическое моделирование физического состояния угольного пласта вокруг горной выработки при дегазации позволяет проводить оперативно многовариантные численные исследования изменяющихся во времени профилей пластового давления газа и напряжений в возмущенном конструктивными элементами газоносном угольном массиве.

4. Для массива без газа зона влияния горизонтальной скважины не зависит от глубины залегания угольного массива. Наибольший размер зоны влияния скважины простирается вдоль горизонтальной оси симметрии скважины, линейным образом зависит от диаметра скважины и не превышает диаметр скважины в 1.4 раза. Наименьший размер зоны влияния простирается вдоль вертикальной оси симметрии скважины и не превышает диаметр скважины в 1.18 раз.

5. Для массива без газа зона влияния скважины зависит от величины бокового распора (коэффициента поперечной деформации). Однако различие размеров зоны влияния для достаточно широкого разброса значений коэффициента бокового распора невелико. Для диапазона значений коэффициента бокового распора от 0.2

до 0.6 различие размеров зоны влияния скважины на массив угля не превышает 8% относительной погрешности.

6. Размеры зоны влияния скважины на угольный газонаполненный массив до начала его дегазации совпадают с размерами влияния скважины на массив без газа.

7. Предложены критерии оценки размеров влияния скважины на угольный массив – по изменению напряжений и по изменению пластового давления газа в окрестности скважины, зависящие от времени дегазации. Оценка размеров влияния скважины на угольный массив в зависимости от выбора критерия приводит к существенно различным результатам. Целесообразность выбора подходящего критерия зависит от целей задачи.

8. Вследствие разнообразия механических, газодинамических и геометрических параметров скважины и угольного массива для каждого шахтопласта востребована необходимость решения многопараметрической задачи с целью установления ожидаемой работоспособности скважины при каптировании газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбензон Л. С. Движение жидкостей и газов в пористой среде. Л. : ОГИЗ, 1947. 244 с.
2. Барренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М. : Недра, 1972. 288 с.
3. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Ленинград : Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1947. 244 с.
4. Баренблатт Г. И., Битов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М. : Недра, 1984. 208 с.
5. Христианович С. А. Об основах теории фильтрации // ФТПРПИ. 1989. № 5.
6. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. М. : Наука, 1972. 140 с.
7. Кузнецов С. В., Кригман Р. Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения. М. : Наука, 1978. 122 с.
8. Курленя М. В., Ли К. Х., Казанцев В. Г., Ли Хи Ун, Кулявцева С. В. Системная формализация и идентификация процессов фильтрационного и диффузионного массопереноса при дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. 2023. № 3. С. 48–58.
9. Ли К. Х., Казанцев В. Г., Тацйлаков О. В., Ли Х. У., Фомин А. И. Модель накопления повреждений угольнопородного массива у дегазационных скважин угольных шахт // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 1.

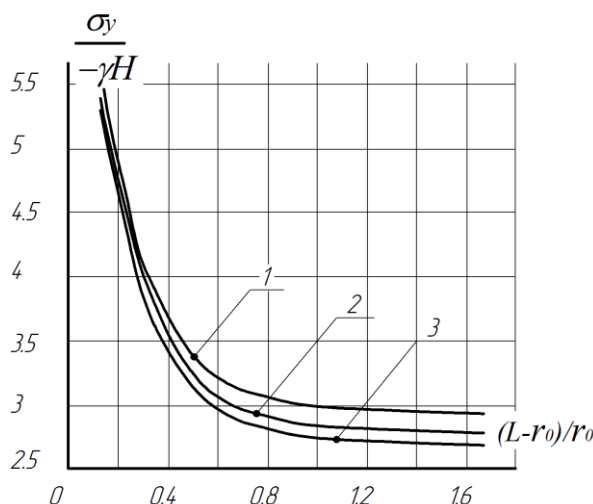


Рис. 9. Зависимость концентрации вертикальных напряжений в боках выработки в зависимости от расстояния между скважинами

Fig. 9. Dependence of the vertical stress concentration in the sides of the workings on the distance between the wells

С. 52–65.

10. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю. [и др.] О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. 2014. № 2. С. 3–30.

11. Курленя М. В., Ли К. Х., Казанцев В. Г., Ли Хи Ун, Зыков В. С. Моделирование влияния гравитации на процесс дегазации метаноносных угольных пластов // ФТПРПИ. 2023. № 4. С. 1–9.

12. Шадрин А. В., Плаксин М. С., Фомин А. И., Трубицын А. А., Трубицына Н. В. Исследование влияния газовой выделенности в выработку на показатель выбросоопасности угольного пласта // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 6. С. 91–96.

13. Айруни А. Т. Газовая динамика и закономерности изменения фильтрационных параметров угольных пластов в зонах влияния горных выработок. Сб. «Проблемы современной рудничной аэрологии». М.: Наука, 1974. С. 117–129.

14. Айруни А. Т., Иофас М. А., Зенкович Л. М. Научные основы определения газопроницаемости угольных пластов при изменяющихся фильтрационных параметрах. ИПКОН АН СССР. М., 1982. 52 с.

15. Большинский М. И., Лысиков Б. А., Каплюхин А. А. Газодинамические явления в шахтах. Монография. Севастополь: Вебер, 2003.

284 с.

16. Пашенков П. Н., Хаутиев А. М. Б., Мазаник Е. В. Методика и результаты определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень, специальный выпуск 32 «Безопасность и экология горного производства». 2018. № 6. С. 54–60.

17. Feng-hua An. [et al.] A numerical model for outburst including the effect of adsorbed gas on coal deformation and mechanical properties // Computers and Geotechnics. 2013. № 54. Pp. 222–231.9.

18. Gu F., Chalaturmyk R. Permeability and porosity models considering anisotropy and discontinuity of coalbeds and application in coupled simulation // J. of Petroleum Science and Engineering. 2010. № 74. Pp. 113–131.

19. Thararoop P., Karpyn Z.T., Ertekin T. Development of a multi-mechanistic, dual-porosity, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs // J. Natural Gas Science and Engineering. 2012. № 8. Pp. 121–131.

20. Безухов И. И. Основы теории упругости пластичности и ползучести. М.: Высшая Школа, 1968. 512 с.

21. Лаврик В. Г., Михеев О. В., Казанцев В. Г. Диагностика и управление состоянием массива горных пород. М.: Изд-во МАС, 2006. 487 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Ли Константин Хиунович, к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «НЦ ВостНИИ», e-mail: chiterzz@mail.ru, ул. Институтская, 3, 650002, г. Кемерово, Россия

Фомин Анатолий Иосифович, д.т.н., профессор, профессор кафедры АОТП КузГТУ, e-mail: fominai@kuzstu.ru, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия

Заявленный вклад авторов:

Ли Константин Хиунович – обзор литературных источников, сбор и анализ данных, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Фомин Анатолий Иосифович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор литературы, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF THE PHYSICAL STATE OF A COAL SEAM AROUND A MINING MINE DURING DEGASSING

Konstantin Kh. Li¹,
Anatoly I. Fomin²

¹ Scientific Center VostNII

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: fominai@kuzstu.ru



Article info

Received:

17 November 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

11 June 2026

Published:

29 June 2026

Keywords: modeling, coal seam, degassing, filtration, sorption pressure, reservoir pressure, stress state, piezoelectric conductivity of the array

Abstract.

In this article, the authors consider options for the mechanical and gas-dynamic interaction of a degassing well with a coal mass. Modeling of gas filtration through the space of a gas-filled coal deposit at stress concentrators is based on phenomenological physico-mechanical concepts of the structure of the array. The gas-bearing massif is considered as a kind of continuous medium with uniform or partially uniform distributed mechanical and gas-dynamic properties. Criteria for estimating the extent of the zones of influence of the well on the coal massif are proposed. From the natural state of the well-mass system, the effects of the well's influence on the natural state of the gas-free mass and the gas-filled mass before and during its degassing have been identified and studied. Numerical modeling of the mechanical and gas-dynamic interaction between the mass and the well shows the dependence of the well's influence zone on the mass from the time of degassing. At the same time, the length of the influence zone boundary during the massif degassing for 180 days is 3.6 of the well diameter, while before the start of degassing, the length of the influence zone is 1.4 of the well diameter. The conducted scientific research has established that the increase in the stress state of the massif near the well due to the decrease in the supporting effect of the reservoir gas pressure is one of the reasons for the increase in the influence zone of the well on the coal massif over time. The mathematical modeling of the physical state of the coal seam around the mine workings during degassing proposed by the authors allows for prompt multi-variant numerical studies of the time-varying profiles of gas reservoir pressure and stresses in the gas-bearing coal mass disturbed by structural elements. Due to the variety of mechanical, gas-dynamic, and geometric parameters of the well and the coal mass, the conducted studies indicate the need to solve a multi-parameter problem about the influence of the degassing well on the coal-bearing massif.

For citation: Li K.Kh., Fomin A.I. Mathematical modeling of the physical state of a coal seam around a mining mine during degassing. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):124-133. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-124-133, EDN: PCXRIE

REFERENCES

1. Lejbenzon L.S. Dvizhenie zhidkostej i gazov v poristoj srede. L.: OGIZ; 1947. 244 s.
2. Barrenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. Teoriya nestacionarnoj fil'tracii zhidkosti i gaza. M.: Nedra; 1972. 288 s.
3. Lejbenzon L.S. Dvizhenie prirodnyh zhidkostej i gazov v poristoj srede. M.-Leningrad: Gosudarstvennoe izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury; 1947. 244 s.
4. Barenblatt G.I., Bitov V.M., Ryzhik V.M. Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnyh plastah. M.: Nedra, 1984. 208 s.
5. Hristianovich S.A. Ob osnovah teorii fil'tracii. *FTPRPI*. 1989. № 5.
6. Fiziko-himiya gazodinamicheskikh yavlenij v shahtah. M.: Nauka; 1972. 140 s.
7. Kuznecov S.V., Krigman R.N. Prirodnaya pronicaemost' ugol'nyh plastov i metody ee opredeleniya. M.: Nauka; 1978. 122 s.
8. Kurlenya M.V., Li K.H., Kazancev V.G., Li Hi Un, Kulyavceva S.V. Sistemnaya formalizaciya i identifikaciya processov fil'tracionnogo i diffuzionnogo massoperenosa pri degazacii ugol'nyh plastov. *FTPRPI*. 2023; 3:48–58.
9. Li K.H., Kazancev V.G., Tacjlov O.V., Li H.U., Fomin A.I. Model' nakopleniya povrezhdenij ugol'noporodnogo massiva u degazacionnyh skvazhin ugol'nyh shaht. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024; 1:52–65.
10. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Gavrilov V.Yu. [et al.] O nekotoryh osobennostyah vzaimodejstviya mezhdru geomekhanicheskimi i fiziko-himicheskimi processami v ugol'nyh plastah Kuzbassa. *FTPRPI*. 2014; 2:3–30.
11. Kurlenya M.V., Li K.H., Kazancev V.G., Li Hi Un, Zykov V.S. Modelirovanie vliyaniya gravitacii na process degazacii metananosnyh ugol'nyh plastov. *FTPRPI*. 2023; 4:1–9.
12. Shadrin A.V., Plaksin M.S., Fomin A.I., Trubicyn A.A., Trubicyna N.V. Issledovanie vliyaniya gazovydeleniya v vyrabotku na pokazatel' vybrosoopasnosti ugol'nogo plasta. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2025; 6:91–96.
13. Ajruni A.T. Gazovaya dinamika i zakonomernosti izmeneniya fil'tracionnyh parametrov ugol'nyh plastov v

zonah vliyaniya gornyh vyrabotok. Sb. «Problemy sovremennoj rudnichnoj aerologii». M.: Nauka; 1974. S. 117–129.

14. Ajruni A.T., Iofyas M.A., Zenkovich L.M. Nauchnye osnovy opredeleniya gazopronicaemosti ugol'nyh plastov pri izmenyayushchihsya fil'tracionnyh parametroh. IPKON AN SSSR. M., 1982. 52 s.

15. Bolypinskij M.I., Lysikov B.A., Kaplyuhin A.A. Gazodinamicheskie yavleniya v shahtah. Monografiya. Sevastopol': Veber; 2003. 284 s.

16. Pashchenkov P. N., Hautiev A. M. B., Mazanik E. V. Metodika i rezul'taty opredeleniya parametrov sorbcii uglja v laboratornyh usloviyah. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten', special'nyj vypusk 32 «Bezopasnost' i ekologiya gornogo proizvodstva»*. 2018; 6:54–60.

17. Feng-hua An. [et al.] A numerical model for outburst including the effect of adsorbed gas on coal

deformation and mechanical properties. *Computers and Geotechnics*. 2013; 54:222–231.9.

18. Gu F., Chalaturnyk R. Permeability and porosity models considering anisotropy and discontinuity of coalbeds and application in coupled simulation. *J. of Petroleum Science and Engineering*. 2010; 74:113–131.

19. Thararoop P., Karpyn Z.T., Ertekin T. Development of a multi-mechanistic, dual-porosity, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs. *J. Natural Gas Science and Engineering*. 2012; 8:121–131.

20. Bezuhov I. I. Osnovy teorii uprugosti plastichnosti i polzuchesti. M.: Vysshaya shkola; 1968. 512 s.

21. Lavrik V.G., Miheev O.V., Kazancev V.G. Diagnostika i upravlenie sostoyaniem massiva gornyh porod. M.: Izd-vo MAS; 2006. 487 s.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Konstantin Kh. Li, C. Sc. in Engineering, Leading Researcher at the Scientific Center VostNII, e-mail: chiterzz@mail.ru, 3 Institutskaya Street, 650002, Kemerovo, Russia

Anatoly I. Fomin, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Automated Processes and Technologies at KuzSTU, e-mail: fominai@kuzstu.ru, 28 Vesennaya Street, 650000, Kemerovo, Russia

Contribution of the authors:

Konstantin Kh. Li – literature review, data collection and analysis, study conceptualization, conclusions, and writing.

Anatoly I. Fomin – research problem statement, scientific management, literature review, and conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

