

УДК 622.453

**МЕТОД «АНАЛИЗ-СИНТЕЗ» В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЛИЯНИЯ
ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКОГО И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

**THE "ANALYSIS-SYNTHESIS" METHOD IN STUDIES OF THE
EFFECT OF DEGASSING WELLS ON THE KINETICS OF THE
FORMATION OF THE MECHANICAL AND GAS-DYNAMIC STATE OF A
ROCK MASS**

Константин Хиунович Ли, к.т.н.

(АО НЦ ВОСТНИИ, г. Кемерово)

Сформулирован метод «анализ-синтез», предназначенный для исследований сложных механических и газодинамических проявлений, происходящих в массиве горных пород при дегазациях угольных месторождений. В качестве примера реализации метода рассмотрено влияние накопления повреждений в угольном массиве у дегазационной скважины как результат изменения пластового давления газа при изменении профиля гравитационного давления в процессе дегазации. Для решения задачи рассматриваются процессы фильтрации газа в массиве, накопления повреждений, воздействия гравитационной составляющей горного давления на массив и их синтез. Показано, что причинами снижения дебита газа являются рост напряженного состояния вокруг добывающих скважин из-за инфильтрации газа в скважину, накопления повреждений в массиве угля, изменение пьезопроводности массива, зависящей от уровня поврежденности.

Ключевые слова: моделирование, угольный пласт, дегазация, фильтрация, сорбционное давление, напряженное состояние, пьезопроводность массива.

Разработка перспективных и совершенствование традиционных технологических средств, обеспечивающих увеличение эффективности дегазации угольных пластов, требует знаний о характере изменения механических, физических и газодинамических процессов, происходящих с течением времени в массиве у дегазационных скважин. Сложность выделения влияния на состояние массива каждого из общей одновременно действующей совокупности явлений у скважины приводит к необходимости расчленения процесса дегазации на простейшие составляющие. Такой подход позволяет изучить, проанализировать и дать рекомендации по управлению каждым из явлений, участвующих в общем процессе дегазации. Описанный прием оценки состояния массива у

дегазационной скважины может быть назван методом «анализ-синтез», которому отводится роль изучения характерных особенностей каждого из явлений, составляющих общий процесс дегазации с последующим объединением простейших составляющих явлений в единое целое.

На рисунке 1 показана идеализированная блок-схема содержания метода «анализ-синтез», использующегося для решения задач дегазации угольных месторождений и пластов.



Рисунок 1 – Блок-схема решения задач о дегазации массива угля с течением времени с использованием метода «анализ-синтез»

Таким образом, схема исследований дегазации пласта по методу «анализ-синтез» позволяет дать объективную и прозрачную оценку событиям, происходящим в том числе в угольном массиве у дегазационных скважин. В качестве предпосылок, формирующих содержание метода «анализ-синтез», можно назвать работу [1], где дан анализ механического влияния скважины на угольный массив без газа; рассмотрены зоны влияния скважины на газонаполненный угольный массив до его дегазации; изучены зоны влияния скважины на угольный массив в процессе его дегазации. Также проведено разделение явления массопереноса на основные составляющие – фильтрацию и диффузию газа, позволившее выделить главные, наиболее важные их черты в общем процессе движения газа. При этом, оценивая влияние гравитации на процесс дегазации, показано, что причинами снижения дебита является рост напряженного состояния вокруг добывчих скважин, установление уровня напряжений, запирающих истечение газа из трещин и пор, а также уменьшение пьезопроводности массива [2].

В качестве продолжения, раскрывающего существование метода «анализ-синтез», рассмотрим поведение массива угля у скважины при длительной дегазации угольного пласта. При этом подлежат анализу процесс накопления

повреждений массива угля с течением времени дегазации и установление на этой основе изменений профилей давлений газа у скважины. Синтез моделей фильтрации газа и накопления повреждений позволяет установить степень их влияния на дебит скважины.

Идея использования модели накопления повреждений в угольнопородном массиве с позиций линейной упругой механики разрушения, почти полностью базирующейся на идеях А.А. Гриффита, Г. Ирвина, Е. Орована об энергетическом балансе тел с трещинами, оказывается не состоятельной как в плане аналитического представления модели, так и в плане установлении критерия разрушения. Это связано с недостатком математических зависимостей, необходимых для получения замкнутых определяющих соотношений, устанавливающих связь работы действующих в теле напряжений с энергией, требуемой для возникновения новых поверхностей ветвящихся трещин, трещин смешанной формы, при наводящейся под нагрузкой кливажной трещиноватости.

В этой связи предпринимаются попытки поиска моделей накопления повреждений, альтернативных методам классической механики разрушения. Например предлагается в качестве определяющих соотношений использовать диаграммы деформирования материала, включающие в себя дефекты, зарождающиеся в процессе нагружения репрезентативных образцов в лабораторных условиях [4]. Сложность подхода заключается в необходимости получения диаграмм деформирования для каждого из элементарных объемов исследуемого массива в случае нарушения принципа простых нагрузений.

Плодотворная идея о накоплении повреждений в массиве угля связывается с изучением кинетики трещинообразования в виде накопления рассеянных множественных повреждений. Отдельные модули модели, в одномерной постановке задачи, включают в себя дополнительные соотношения, описывающие изменение упругих деформационных характеристик массива угля под нагрузкой вследствие накопления поврежденности [6]. При этом временной фактор учитывается опосредованно через коэффициент нарушенности пласта, изменяющийся в зависимости от уровня поврежденности.

В работах [6, 7] математическая модель накопления повреждений в трактовке С.Н. Журкова и Л.М. Качанова уже включает в себя фактор времени непосредственно.

Кинетическое уравнение поврежденности представляется в виде функциональной зависимости скорости роста повреждений в зависимости от некоторого эквивалентного напряжения σ_{ekw} , действующего в массиве горных пород:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -A \cdot \left(\frac{\sigma_{ekw}}{\theta} \right)^n, \quad 0 \leq \theta \leq 1, \quad (1)$$

где $A \cdot \left(\frac{\sigma_{ekw}}{\theta} \right)^n$ – функция поврежденности массива [8]; θ – величина поврежденности ($\theta=1$ – материал поврежден, $\theta=0$ – поврежденность

отсутствует, $0 \leq \theta \leq 1$); A – коэффициент долговременной прочности; $n < 0$ – показатель трещинообразования; σ_{ekw} – комбинация компонент тензора напряжений, действующих в массиве, рассчитывается в соответствии с принятой теорией прочности.

Решение задачи о накоплении повреждений осуществляется с использованием функционала потенциальной энергии деформирования механической системы:

$$J(x, y, z) = \int_V \{\sigma\}^t \{\varepsilon\} dV - \int_\Gamma \{S\}^t \{u\} d\Gamma - \int_V \{F\}^t \{u\} dV, \quad (2)$$

где V – объем тела; $\{\sigma\}$ – вектор, содержащий компоненты тензора напряжений; t – операция транспонирования матриц; $\{\varepsilon\}$ – вектор, содержащий компоненты тензора деформаций; $\{S\}$ – вектор сил, действующих на поверхности Γ тела; $\{u\}$ – вектор компонент перемещений в направлении осей координат; $\{F\}$ – вектор массовых сил.

Дискретизация функционала (2) осуществляется с использованием широко известного численного метода – метода конечных элементов (МКЭ). В этом случае в качестве элементарных объемов угольнопородного массива принимаются объемы конечных элементов, на которые дискретизируется расчетная схема задачи.

Заданием геометрии изучаемого объекта его физико-механических характеристик, граничных условий и условий нагружения определяется задача оценки напряженно-деформированного состояния угля и вмещающих пород.

Пошаговая процедура решения задачи накопления повреждений и определение очагов разрушений угольнопородного массива оценивается с использованием принципа линейного суммирования повреждений в условиях ползучести, постулированного Робинсоном и Бейли:

$$\sum_{k=1}^s \theta_k = \sum_{k=1}^s \frac{\Delta t}{(t_p - k \cdot t_{uc})}, \quad (3)$$

где s – задаваемое число временных шагов; Δt – временной расчетный шаг; $(t_p - t_{uc})$ – время до разрушения элементарного объема (объем конечного элемента), в котором действует расчетное постоянное напряжение $\sigma_p = \sigma_{ekw}$; t_p – расчетное время; t_{uc} – время начала отсчета накопления повреждений.

Вторая из моделей для анализа неустановившегося массопереноса газа по фильтрационному объему угля и пород при длительной дегазации угольного пласта с вариационной точки зрения эквивалентна решению линеаризованного дифференциального уравнения Л.С. Лейбензона [11], представляется функционалом [2]:

$$F(x, y, z) = \int_V \frac{1}{2} \left[a_x^* \left(\frac{\partial P^2}{\partial x} \right)^2 + a_y^* \left(\frac{\partial P^2}{\partial y} \right)^2 + a_z^* \left(\frac{\partial P^2}{\partial z} \right)^2 - 2 \left(G - \frac{\partial P^2}{\partial t} \right) P^2 \right] dV + \\ + \int_S \frac{\eta}{2} \left[(P^2)^2 - 2P^2 p_\infty^2 + (p_\infty^2)^2 \right] dS, \quad (4)$$

где G – источник или сток газа; η – коэффициент массообмена вдоль границы S ; p_∞ – величина давления вне фильтрационного объема V , например, концентрация газа в атмосфере у обнажений; P – пластовое давление газа; a_i^* – коэффициенты пьезопроводности газа в массиве пород ($i = x, y, z$ – направления осей координат).

Дискретизация и решение функционала (4) осуществляется с использованием метода конечных элементов. Причем решение задач с использованием соотношений (2) и (4) осуществляется на одной и той же сетке конечных элементов.

Заметим, что при решении задач фильтрации газа в угольнопородном массиве в качестве элементарного объема угля и пород принимается объем конечного элемента, в котором пластовое давление газа и коэффициенты пьезопроводности на расчетный момент времени принимаются постоянными величинами. В этом случае в каждом из объемов конечных элементов нелинейное дифференциальное уравнение фильтрации может быть линеаризовано по Лейбензону, и соотношение (4) остается справедливым.

Таким образом, задание геометрии изучаемого объекта, граничных и начальных условий, величин коэффициентов проницаемости, пористости и вязкости газа полностью определяют фильтрационную задачу.

При всем многообразии физических явлений, происходящих в массиве угля у скважины, одним из важнейших является формирование фильтрационных характеристик угля во времени. На основании анализа многочисленных экспериментальных данных [14, 15, 16, 17, 18] о закономерностях фильтрации жидкости и газа в массивах, пронизанных квазизотропным трещинно-пористым коллектором с хаотическим распределением трещин, можно установить, по крайней мере, два диапазона изменения фильтрационных характеристик. На начальных стадиях деформирования массива (первые часы после проходки), когда происходит раскрытие пор и трещин, возникают и суммируются новые повреждения, коэффициент пьезопроводности увеличивается. С течением времени при возникновении заключительной стадии разрушения массива, чему соответствуют запредельные участки диаграммы деформирования, когда уголь становится смятым в пределах фронта разрушения, его проницаемость резко снижается.

В работе [13] в условиях физики сопротивления угольного массива непрерывному разрушению в качестве аппроксимации изменения фильтрационных характеристик в зависимости от стадии его дезинтеграции к использованию предлагается выражение для коэффициента пьезопроводности a_θ^*

, поставленного в соответствие с уровнем текущей поврежденности горных пород:

$$a_\theta^* = [c \cdot \theta + a^*] \cdot \exp[-b \cdot \theta], \quad (5)$$

где a^* – коэффициент пьезопроводности материала в исходном состоянии; c, b – константы, определяемые экспериментально.

Более подробно модель фильтрации природного газа в газонаполненных угольных пластах с учетом гравитации рассмотрена в работах [2, 12].

Посредством соотношений (1), (2), (3), (4) и (5) осуществляется «связь» – синтез задач фильтрации, деформирования и накопления повреждений.

На рисунке 2 представлена блок-схема решения задач о влиянии дегазационных скважин на формирование механического и газодинамического состояния массива для случая длительной дегазации горных пород с учетом накопления повреждений.

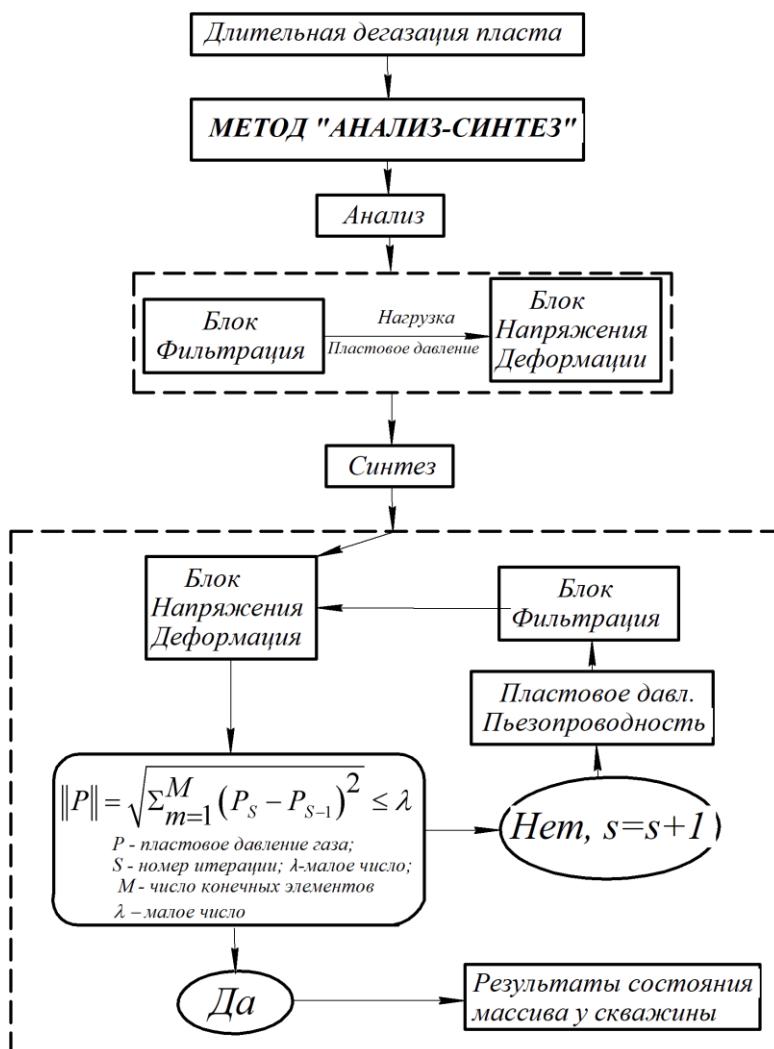


Рисунок 2 – Блок-схема решения задач о состоянии угольнопородного массива у дегазационных скважин для случая синтеза явлений фильтрации, деформирования и накопления повреждений

Рассмотрим пример реализации разработанной модели для оценки кинетики дебита одиночной скважины, находящейся в нестационарном силовом геомеханическом поле при длительной дегазации пласта, рисунок 3.

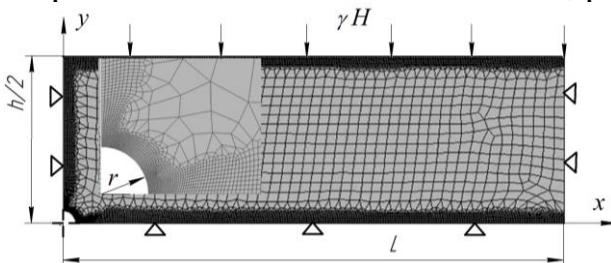


Рисунок 3 – Расчетная схема пласта и ее дискретизация на конечные элементы у скважины

Исходные данные для расчетов.

Размеры пласта угля – $hxL = 2 \times 20$ м, где h – мощность пласта. Пласт находится на глубине $H = 400$ м от дневной поверхности. Диаметр скважины 0,15 м. Представленная на рисунке 3 схема приемлема для скважины, находящейся в условиях плоской деформации и упругой фильтрации газа.

Модуль упругости угля $E = 12500$ МПа на допредельном участке деформирования диаграммы. Модуль упругости угля $E_d = 100$ МПа на запредельном участке деформирования диаграммы. Пористость массива угля $m = 4\%$. Показатель $n = 1,5$; $\sigma_{cж} = 25$ МПа – предел прочности на сжатие; $\sigma_d = 0.7 \cdot \sigma_{cж}$ – рисунок 1. Коэффициент поперечной деформации $\nu = 0.25$ на допредельном участке деформирования диаграммы. Коэффициент поперечной деформации $\nu_d = 0.01$ на запредельном участке деформирования диаграммы. По верхней границе на пласт наложено гравитационное давление, которое определено для средневзвешенного удельного веса слагаемых горных пород $\gamma = 2500$ кг/м³ и составляет $P_1 = \sigma_y = -10$ МПа. Давление в скважине $P_2 = 0,08$ МПа. Сорбционное (начальное) давление газа в пласте угля равно величине $P_S = 3,45$ МПа; $\alpha = 6,0 \cdot 10^{-6}$, 1/МПа – коэффициент линейного расширения скелета угля под действием давления газа в порах. Коэффициент α соответствует величине $1/(3 \cdot E_1)$, где E_1 – модуль объемной упругости. Значение коэффициента линейного расширения скелета угля получено с использованием газотемпературной аналогии [13].

Треугольный маркер, запрещающий узловые перемещения по нормали вдоль маркерной линии, показывает кинематические граничные условия. По границе пласта отмеченным треугольным маркером заданы газодинамические условия второго рода $q = \partial p / \partial n = 0$ (n – нормаль к граничной поверхности), обеспечивающие условия симметрии полигона расчетной схемы.

Начальное значение коэффициента пьезопроводности дегазированного массива получено для коэффициента динамической вязкости, равного $\mu(P, T) = 11.17 \times 10^{-12}$ МПа·с, при температуре массива $T = 20^{\circ}\text{C}$. Величина пористости пласта принята равной $m = 4\%$.

Для этих условий начальное значение коэффициента пьезопроводности вычисляется из зависимости:

$$a^* = K_0 \cdot 7.72 \cdot 10^{12} \text{ м}^2/\text{с},$$

где $K_0 = 10^{-17} \text{ м}^2 / \text{с}$.

Обработка результатов испытаний по данным работ [14, 15, 16, 17, 18] для угля, имеющего среднюю начальную трещиноватость, приводит к следующим значениям параметров для соотношения (5): $c = 0,00075$; $b = 4,97$.

Представленные исходные данные приняты как средние величины механических и газодинамических свойств, близких к углю Прокопьевского месторождения.

Нижеприведенные результаты исследований представлены для случая дегазации пласта пологого падения горизонтальной скважиной, рисунок 4, в течение от одного до трех месяцев.

Анализ и синтез результатов расчетов показаны ниже на рисунках как результат влияния скважины на угольный массив в рамках совокупности явлений, отражающих действие гравитационной нагрузки, фильтрации газа, накопления повреждений, изменения газодинамических и механических свойств пласта.

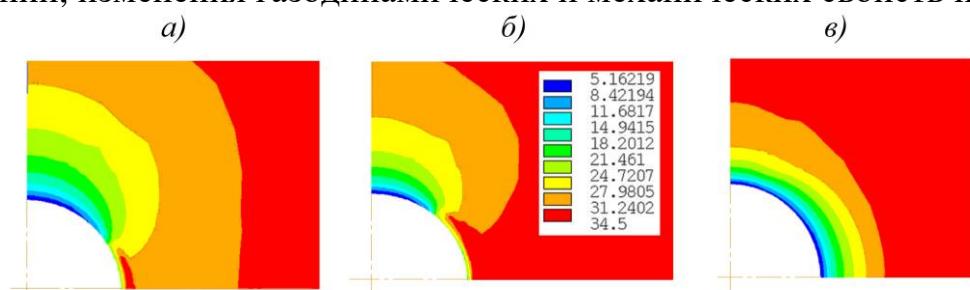


Рисунок 4 – Изолинии изменения пластового давления газов в массиве угля у скважины: а) 1 месяц дегазации пласта; б) 2 месяца; в) 3 месяца дегазации пласта. $P_S = 34.5 \text{ кг}/\text{см}^2$ – сорбционное давление

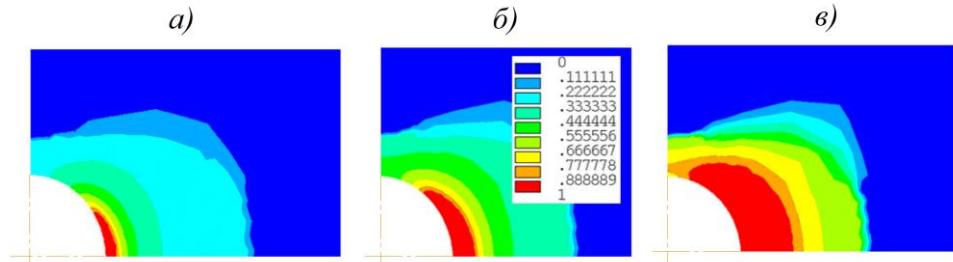


Рисунок 5 – Изолинии изменения накопления повреждений в массиве угля у скважины: а) 1 месяц дегазации пласта; б) 2 месяца; в) 3 месяца дегазации пласта. $\theta=1$ – материал поврежден

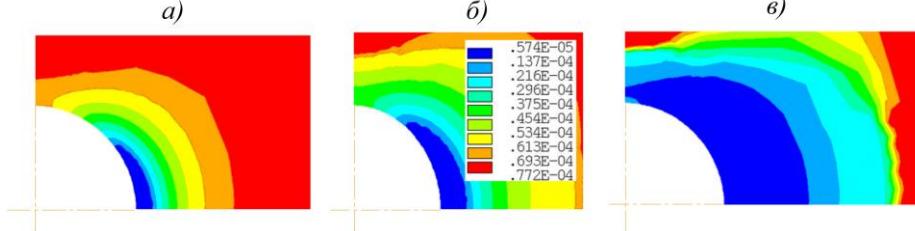


Рисунок 6 – Изолинии изменения коэффициента пьезопроводности в массиве угля у скважины: а) 1 месяц дегазации пласта; б) 2 месяца; в) 3 месяца дегазации пласта

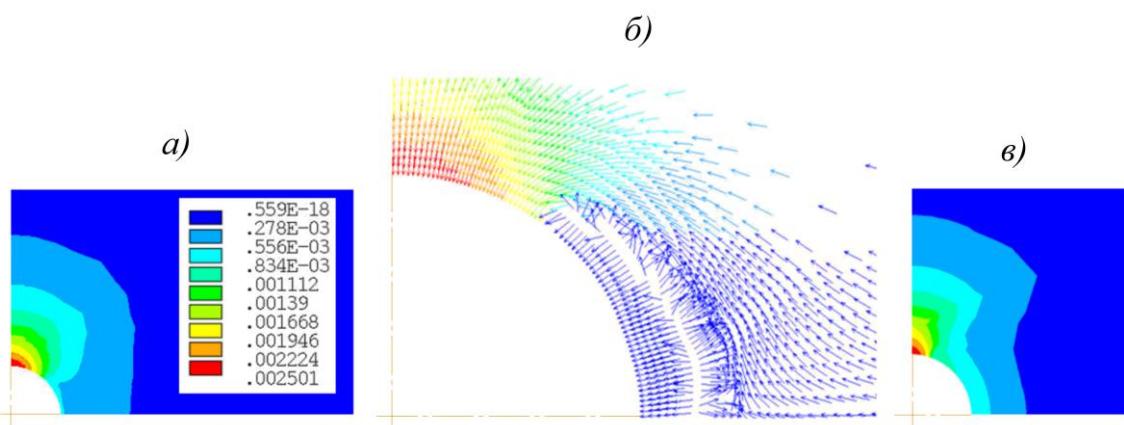


Рисунок 7 – Изолинии скорости потока газа в массиве угля у скважины: а) 1 месяц дегазации пласта; в) 3 месяца дегазации; б) направление вектора скорости газа в массиве угля у скважины, 2 месяца дегазации пласта

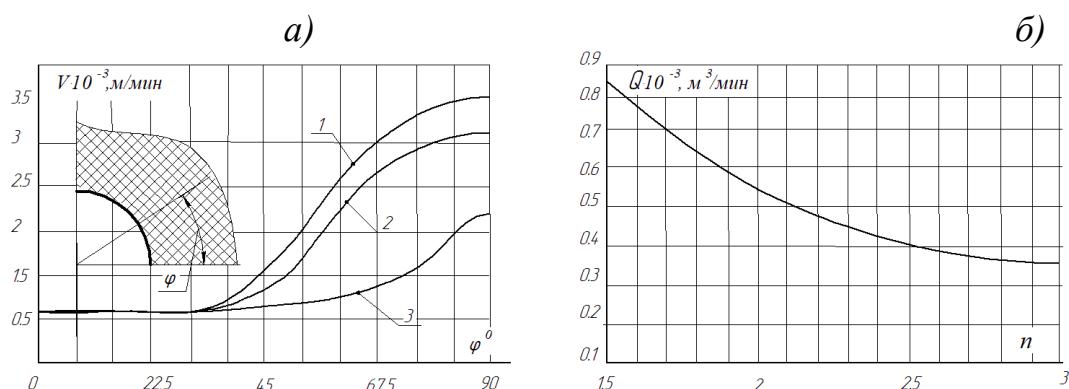


Рисунок 8 – Скорость потока фильтрации газа по углу φ на границе скважина-массив: а) 1 месяц дегазации пласта, 2 месяца, 3 месяца дегазации пласта; б) дебит газа в зависимости от показателя трещинообразования массива через 3 месяца дегазации пласта

Использование метода «анализ-синтез» для изучения процесса дегазации пластов угля скважинами приводит к следующим оценкам, результатам и выводам.

1. Сформулирован метод «анализ-синтез» для исследований сложных механических и газодинамических явлений в массиве горных пород, подразумевающий их разделение на простейшие составляющие, анализ их проявлений, с последующим синтезом результатов взаимного влияния.
2. Анализ изменения пластового давления газов у скважины от величины сорбционного давления в глубине массива P_S до пластового давления P у скважины, рисунок 4, показывает, что за счет «истощения» массива в результате инфильтрации – утечки газов из массива в скважину, снижается поддерживающий эффект массива давлением газа,

противодействующим гравитационной нагрузке. Гравитационная нагрузка у скважины становится нестационарной, изменяется непрерывно в процессе дегазации пласта.

3. Следуя Л.М. Качанову, линию, которая разделяет область разрушения массива $\theta=1$ от неразрушенного массива $\theta<1$, назовем фронтом разрушения, рисунок 5. Для случая газодинамического состояния угля за фронтом разрушения $\theta<1$, коэффициент пьезопроводности за счет накопления повреждений увеличивается с понижением в глубину массива, находящегося в его естественном состоянии, что влечет за собой соответствующее изменение скорости фильтрации газа в этих зонах, рисунки 5-7.
4. С увеличением времени дегазации пласта угля из-за «истощения» газа в массиве у скважины, с изменениями в схемах деформирования пласта, с изменениями протяженности зон влияния скважины на массив во времени, дебит скважины уменьшается, рисунок 8.
5. Для восстановления фильтрационных свойств массива угля, изменяющихся с течением времени, требуется разработка и проведение горнотехнических мероприятий, базируясь на представлениях о газодинамических и геомеханических процессах, происходящих у скважины и прилегающего к ней массиву угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 3. С. 48 – 58
2. 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.
3. Ли К.Х., Казанцев В.Г., Тайлаков О.В., Ли Хи Ун, Фомин А.И. Модель накопления повреждений угольнопородного массива у дегазационных скважин угольных шахт // Вестник Кузбасского государственного университета. 2024. № 1 (161). С. 52 – 65.
4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения // М.: Наука, 1974. 640 с.
5. Чирков С.Е., Фисенко Г.Л., Норель Б.К. Методика расчета параметров прочности и предельных состояний угольных пластов в призабойной зоне // М.: Изд. ИГД им. Скочинского, 1983. 38 с.
6. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел // М.: Наука. 1974. 264 с.
7. Качанов Л.М. Основы механики разрушения // М.: Недра, 1974. 560 с.

8. Михеев Г.В. К практическому определению прочности горных пород на сжатие по результатам на растяжение // Труды ВНИМИ, 1974. № 92. С. 139 – 140.
9. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов / М.: Наука, 1972. 327 с.
10. Клишин В.И., Опрук Г.Е., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Обоснование активных способов предразрушения подкровельной толщи при отработке мощных пологих пластов с выпуском угля // ФТПРПИ. 2020. № 3. С. 75 – 84.
11. Лейбензон Л.С. Движение жидкостей и газов в пористой среде // Л.: ОГИЗ, 1947. 244 с.
12. Ли К.Х., Казанцев В.Г., Ли Хи Ун, Зыков В.С., Иванов В.В. Влияние дегазационных скважин на кинетику состояния углеметановых пластов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2023. № 1. С. 33 – 41.
13. Казанцев В.Г., Золотых С.С. Управление состоянием массива горных пород // Кемерово: Кузбассвузиздат, 2001. 468 с.
14. Хаппель Дж., Бреннель Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса // М.: Мир, 1976. 630 с.
15. Ширко И.В. Численные исследования течений в гранулированных средах // Численное моделирование в аэрогидродинамике. М.: Наука, 1986. 245 с.
16. Щелкачев В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме // М.: Гостоптехиздат, 1959, 273 с.
17. Авокян Э.А., Горбунов А.Т., Николаевский В.Н. Нелинейно упругий режим фильтрации в трещиноватых пористых пластах // М.: Недра, 1968. 112 с.
18. Николаевский В.Н. К построению нелинейной теории упругого режима фильтрации жидкости и газа // Прикл. Механика и техн. Физика. 1961. № 4. С. 18 – 23.