

УДК 622.281:533.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ БЕСЦЕЛИКОВОЙ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ

Звягильский Е.Л., Бокий Б.В., Касимов О.И.

(АП «Шахта им. А.Ф.Засядько», г. Донецк, Украина),

Назимко В.В., Журба В.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Комп'ютерне моделювання дифузії газу у вуглевміщуючій товщі з анізотропною проникливістю дозволило встановити закономірності газовиділення навколо очисного вибою, що рухається.

Computer modeling has been used to investigate methane filtration in vicinity of moving longwall face. Numerical solving of partial differential equation helped to understand peculiarities of gas flows in anisotropic rock mass if boundary conditions are not stationary and permeability of the surrounding rock mass changes in space and in time.

Введение.

Обеспечение рентабельности угольных шахт Донбасса требует увеличения нагрузок на очистные забои до 3000-5000 т/сут без значительного увеличения затрат на проведение и поддержание горных выработок. В газообильных шахтах этого можно достичь только путем комплексной дегазации лав, обеспечивающей каптаж не менее 80% выделяющегося в них метана. Усилиями многих исследователей разработаны способы дегазации сближенных пластов и окружающих пород скважинами, пробуренными с поверхности [1-4] и из горных выработок [5-10], каптажа и вывода из шахт газа, выделяющегося из выработанных пространств [11-12], ведется поиск способов предварительной дегазации угольных пластов, неразгруженных от горного давления. Большая часть

этих работ основана на эмпирических методах, когда результаты достигаются путем анализа и обобщения дорогостоящих шахтных наблюдений и экспериментов в различных горно-геологических условиях. Это не позволяет надежно прогнозировать эффективность применения способов дегазации в условиях, отличающихся от экспериментальных.

Давно установлено, что формирование газовых потоков в породах, окружающих горные выработки, связано с процессом сдвижения пород, вызванным выемкой ископаемого [6, 7, 11, 13-21], однако до настоящего времени нет метода расчета направления и интенсивности газовых потоков в породном массиве, разгружающемся от горного давления. Такой метод позволил бы выбрать места, направления и параметры бурения дегазационных скважин, определять оптимальные режимы их вакуумирования. По нашему мнению, он может быть разработан с помощью математической модели, учитывающей современное представление о фильтрационных свойствах пород над выработанным пространством и распределении давления газа в этих породах.

Нами предпринята попытка создания такой модели, описание которой приведено в следующих разделах.

Описание модели и методика исследований.

Нестационарной изотермической фильтрации метана в окрестности движущегося очистного забоя можно поставить в соответствие – с изрядной долей упрощающих ограничений – квазилинейное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных (ДУЧП) параболического типа [22]:

$$\partial p / \partial t = \partial / \partial x (D_x \cdot \partial p / \partial x) + \partial / \partial y (D_y \cdot \partial p / \partial y) + S(x, y, t). \quad (1)$$

где $p(x, y, t)$ – давление газа в точке массива с координатами (x, y) в произвольный момент времени t ; $D_x(x, y, t)$, $D_y(x, y, t)$ – компоненты тензора диффузивности («гидравлической», в отличие от молекулярной) [23], зависящей от координат и времени.

Функция $S(x,y,t)$ имитирует распределенный источник возмущения давления, обусловленного газоразделением из внешнего, по отношению к потоку газа, источника.

Здесь существенно, что коэффициенты $D_x(x,y,t)$ и $D_y(x,y,t)$ оставлены под знаком соответствующих частных производных по координатам. Это позволяет ожидать от математической модели «реакции», наряду с нестационарностью фильтрации газа, на анизотропность среды, которой является слоистый массив осадочных горных пород. При этом учитываются накопленные практикой представления о характере проводимости массива в зависимости от его нарушенности и напряженного состояния.

Так, в нетронутом массиве, вследствие наличия природных плоскостей ослабления вдоль напластования, проводимость вдоль слоистости превышает в несколько раз проводимость по нормали к напластованию. И, наоборот, в зоне необратимых сдвижений проводимость определяется трещинами горного массива и поэтому её составляющая вдоль нормали к напластованию в несколько раз превышает проводимость в плоскости напластования. В целом проводимость в обрушенных породах или в зоне неупругих деформаций вокруг подготовительной выработки на несколько порядков выше, чем в нетронутом массиве. Учет реального соотношения между проводимостью массива в разных его геомеханических состояниях и направлениях весьма важен для правильной постановки исходных ограничений задачи.

Следует оговорить, что ДУ (1) предполагает ламинарность режима фильтрации газа. Мы допускаем, что такое довольно грубое приближение имеет место в подавляющей части объема горного массива. Лишь в непосредственной окрестности призабойного пространства развивается турбулентность, поправки на которую предполагается ввести в последующие версии математической модели. Здесь же акцент сделан на изучении преимущественно качественной картины фильтрации с переменными коэффициентами диффузивности в сочетании с

нестационарными граничными условиями.

Несколько слов в оправдание ограниченного числа измерений поля движения. На первом этапе решено ограничиться двумерной задачей, отслеживая тенденции распределения давления газа в мгновенных снимках в последовательные моменты времени t семейств плоских параллельных друг другу вертикальных сечений в зоне активных сдвижений в трехмерном пространстве вокруг лавы. Общая нормаль к этому семейству ориентирована вдоль направления движения лавы.

Фильтрация метана в выработанное пространство лавы неразрывно связана с процессом сдвижения массива в окрестности движущегося очистного забоя. Поэтому разработка модели включает предварительный анализ распределения напряжений в окрестности движущейся лавы. Более общим случаем является отработка примыкающей к ранее выработанному пространству лавы, как это показано на рис. 1. Видно, что распределение давления в плоскости пласта характеризуется существенной неравномерностью. Особенно неравномерное распределение горного давления отмечается вдоль границы ранее выработанного пространства, что видно из сечения на рис. 2. На этом рисунке лава движется влево. Расчеты горного давления выполнялись для условий пласта m_3 шахты им. Засядько на глубине 1000 м. Вынимаемая мощность пласта составляет 2 м, длина очистного забоя 250 м, скорость его подвигания равна 150 м/мес.

Характерно, что активизация сдвижений в ранее выработанном пространстве происходит на большой площади, причем распространяется далеко впереди движущейся примыкающей лавы.

Это иллюстрируется на рис. 3, где видно, как концентрация горного давления в ранее выработанном пространстве увеличивается в 1,6 раза, а зона активизации сдвижений распространяется почти на 300 м впереди

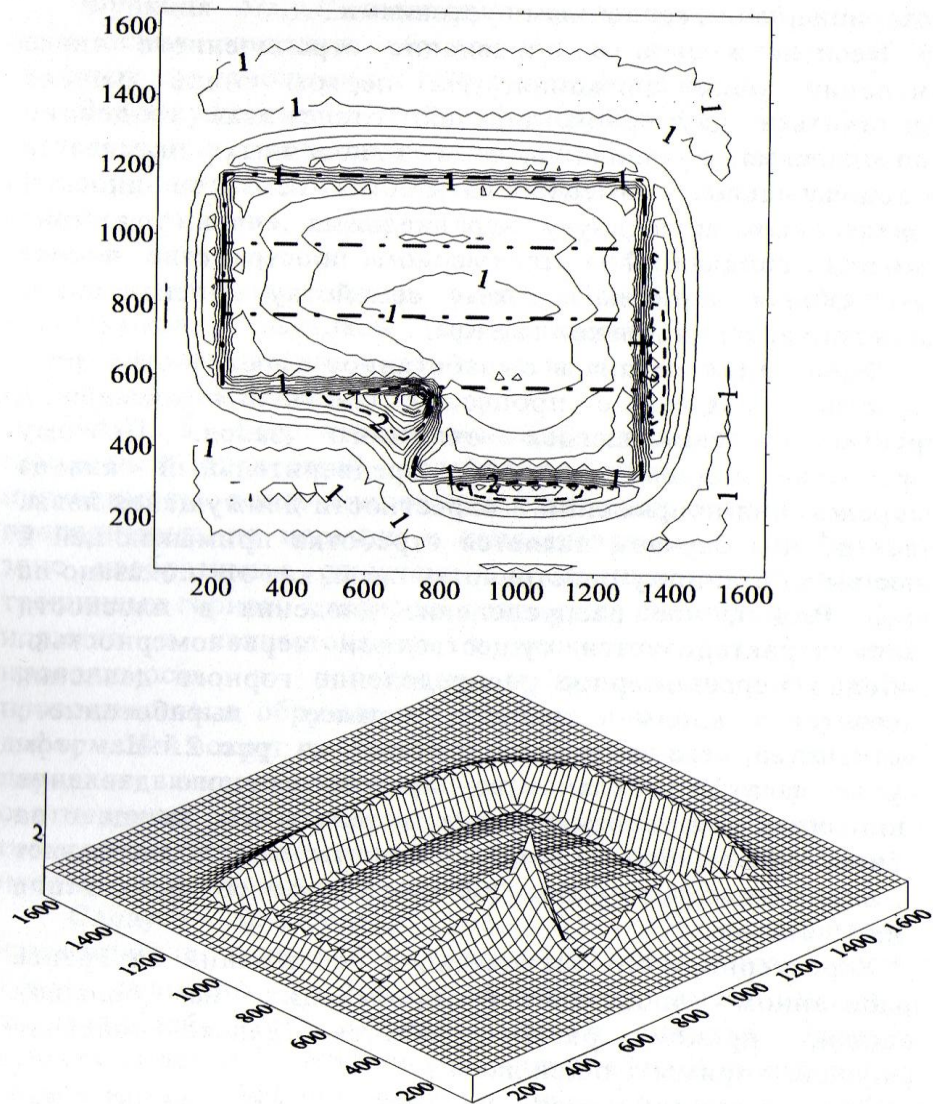


Рис. 1. Распределение концентрации горного давления в окрестности примыкающей к ранее выработанному пространству лавы

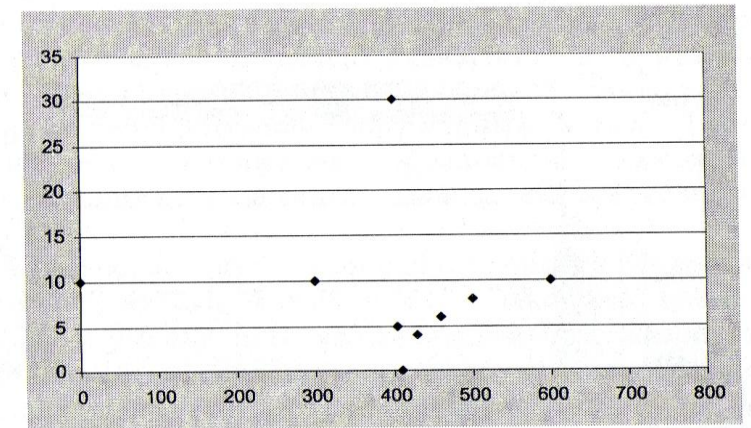
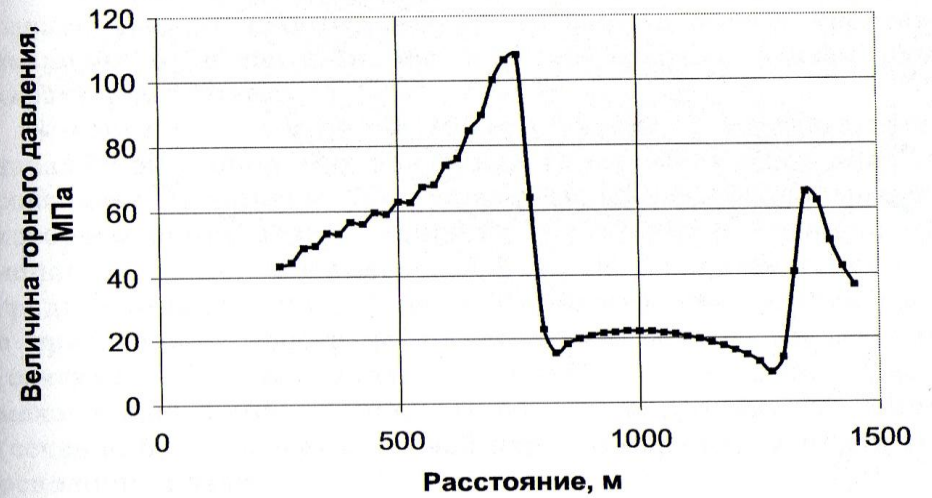


Рис. 2. Распределение напряжений и степени сжатия массива вдоль простирания

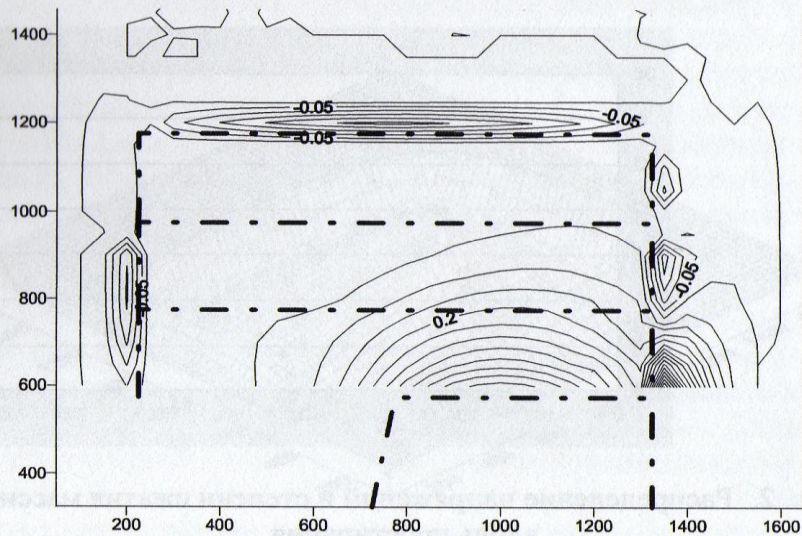
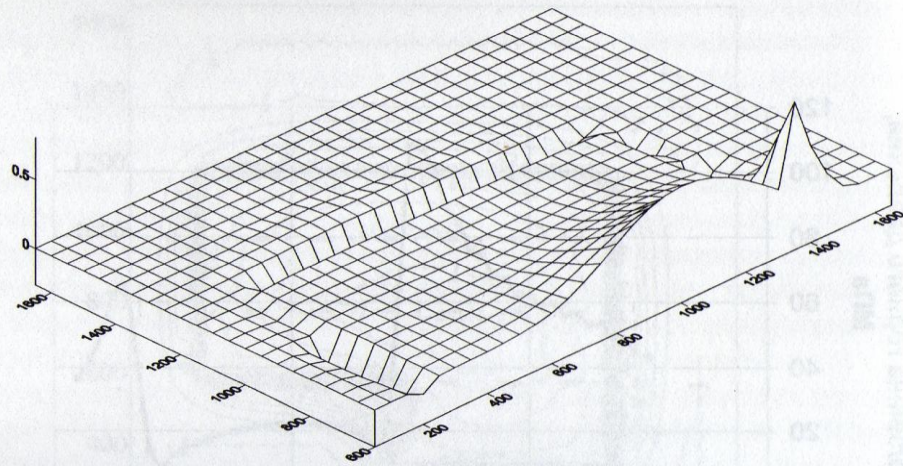


Рис. 3. Распределение дополнительных напряжений в окрестности движущейся лавы

движущегося очистного забоя. Эти особенности следует учесть при построении расчетной схемы.

На рис. 2, б приведена обобщенная эпюра горного давления вдоль простирания. За 10 единиц принят уровень давления в нетронутом массиве. На графике указан ряд характерных точек.

Точка с координатой 300 м (сечение 1) соответствует началу зоны опорного давления. Точка 400 м (сечение 2) совпадает с пиком опорного давления, концентрация которого принята за 3 единицы. Точка 405 м (сечение 3) попадает в зону отжима краевой части угольного пласта у груди очистного забоя. Точка 410 м (сечение 4) расположена в призабойном пространстве очистного забоя. Точка 430 м (сечение 5) расположена позади режущего ряда механизированной крепи. Точка с координатой 460 м (сечение 6) совпадает с линией первого обрушения пород до основной кровли.

В координате 500 м (сечение 7) происходит посадка основной кровли и вышележащей над ней толщи. В точке 600 м активная стадия процесса сдвижений в основном завершается. На участке 600-800 м (сечение 8) происходит консолидация и доуплотнение обрушенных пород. Такая растяжка процесса сдвижения обусловлена высокими темпами подвигания очистного забоя, составляющими 150 м/мес. и более.

Хорошо известно, что увеличение горного давления уплотняет горный массив, что приводит к закрытию трещин и отдельностей и уменьшению его проводимости. Наоборот, процесс обрушений и оседаний, а также отжима краевой части пласта увеличивает степень трещиноватости и на порядок повышает газовую проводимость углевмещающей толщи. На основании этого проницаемость массива задавалась в соответствии с уровнем трещиноватости массива и действующего в характерных сечениях горного давления, как показано в табл. 1.

Таблиця 1
Значення провідимості (отн. ед.) горного масива в характерних зонах

	Нейтронутый массив	Зона ОД	Зона отжима	В зоне обрушения непосредственной кровли	В зоне посадки основной кровли	В области сдвижений вышележащих пород	В зоне консолидации обрушенных пород	Старое выработанное пространство
D _X Кровля	40	20	80	5000	4000	3000	1300	1000
D _X Почва	40	20	80		1500	1400	1300	1000
D _Y Кровля	20	10	200	4000	8000	3000	2500	2000
D _Y Почва	20	10	200		4000	3000	2500	2000

Проводимость пород вокруг конвейерного штрека принималась 4000-4100 относительных единиц. При этом радиус зоны неупругих деформаций вокруг выработки принимался в зоне опорного давления 5 м, в зоне активных сдвижений и оседаний позади лавы 8 м.

Модель строилась таким образом. На рис. 2 выделялись характерные сечения, привязанные к точкам, положение которых обсуждалось выше. На рис. 4 приведены эти сечения. Надо отметить, что процесс сдвижений в примыкающей лаве несимметричен относительно ее середины и как показано на рис. 1 изолинии давления и обрушения смещаются в сторону

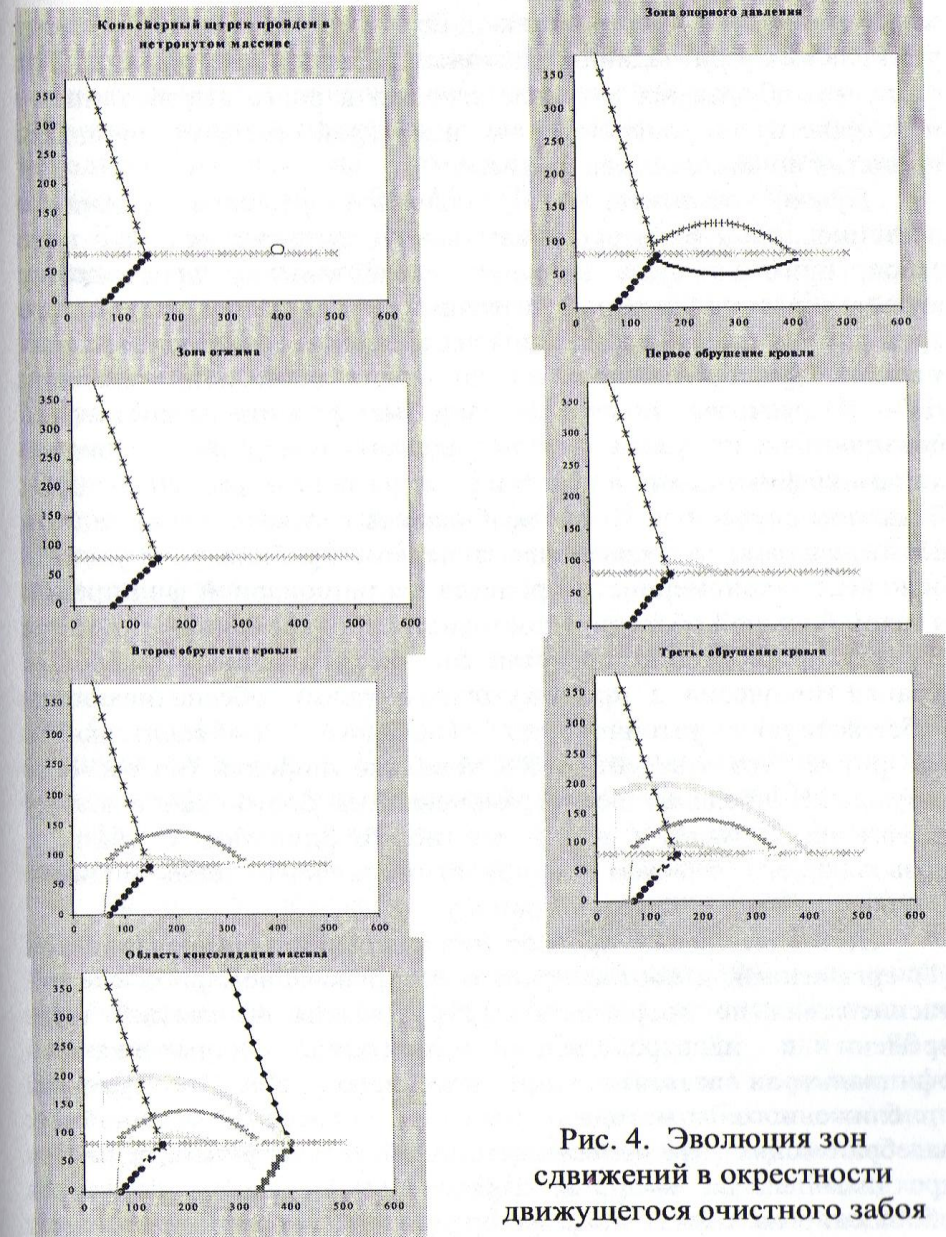


Рис. 4. Эволюция зон сдвижений в окрестности движущегося очистного забоя

выработанного пространства. Это обстоятельство также учитывалось при задании исходных условий для расчета. Тот факт, что обрушения в кровле тяготеет к ранее выработанному пространству и опережает в некоторой степени процессы поднятия почвы, отражен на рис. 4.

Нужно отметить, что численное решение задачи о нестационарной фильтрации газа вокруг движущегося очистного забоя, примыкающего к ранее выработанному пространству является весьма сложной с точки зрения затрат машинного времени и памяти даже для современных вычислительных машин. При применении конечно-разностной аппроксимации ДУ-я (1) расчетная область должна быть разбита на достаточно большое число узлов, чтобы адекватно отразить сложную динамику фильтрации в области размерами порядка 400 м×500 м. В данном случае оси X и Y разбивались соответственно на 30 и 25 интервалов, что позволило в первом приближении уловить основные закономерности процесса нестационарной фильтрации в такой большой области. Пространственно-временная структура ДУ (1) приближенно представлена шеститочечным шаблоном Кранка-Николсона с промежуточным узлом, обеспечивающим «абсолютную устойчивость» неявного вычислительного алгоритма. Это означает, что в довольно широких (но все-таки разумных!) пределах нет ограничения на соотношение между шагом по времени t и шагами по координатам x и/или y , позволяющего избежать недопустимого накопления ошибки вычислений за допустимую границу.

Вычислительный процесс численного интегрирования ДУ (1) организован в соответствии с локально-одномерной схемой расщепления по координатам [25]. Дважды на каждом шаге времени t непосредственной прогонкой («прогонка» - официальное название предложенного С.К. Годуновым приближенного метода решения системы линейных алгебраических уравнений ленточной структуры,) решается трехдиагональная матрица. Примененный подход допускает обобщение на случай трех измерений, что будет использовано при дальнейшем развитии темы.

Пробные «прогонки» подсказали, что для исследования процесса фильтрации, включающего основные стадии начала, развития и затухания необходимо хотя бы 200 шагов по времени. Затраты машинного времени для просчета одного варианта исходных данных на компьютере с процессором «Intel Pentium III» (533 МГц) и 256 Мб ОЗУ составило до 25 мин.

Если бы моделировался процесс фильтрации в реальном интервале времени, который в данном случае соответствовал подвиганию очистного забоя примерно на 600 м и был равен 4 месяцам, задача вообще бы не была решена, поскольку на ее решение потребовалось бы весьма большое машинное время. Сокращение времени решения было достигнуто за счет применения непрямого метода учета времени путем применения гидродинамического критерия F подобия Фурье, при соблюдении которого длительные процессы фильтрации в среде с низкой проводимостью подобны быстрым процессам в среде с высокой проводимостью:

$$F = D\tau/S,$$

где D - коэффициент общей фильтрации; τ - продолжительность процесса фильтрации; S - характерный размер сечения горного массива, через который происходит фильтрация газа [24].

На основании сказанного в табл. 1 приведены величины проводимости массива в характерных зонах.

На рис. 5 показаны начальные условия, при которых решалась задача. Верхняя граница модели принималась на расстоянии 150 вынимаемых мощностей или 300 м от кровли обрабатываемого пласта. Нижняя граница устанавливалась на расстоянии 40 вынимаемых мощностей или 80 м. Экспериментально установлено, что давление газа на уровне этих границ практически не меняется после отработки очистного забоя. Уровень давления газа принимался в нетронутым массиве из расчета $0,01 H$, где H - глубина залегания пород. Над и под ранее выработанным пространством уровень давления несколько (на 10-15%) снижался, чтобы отразить длительный процесс

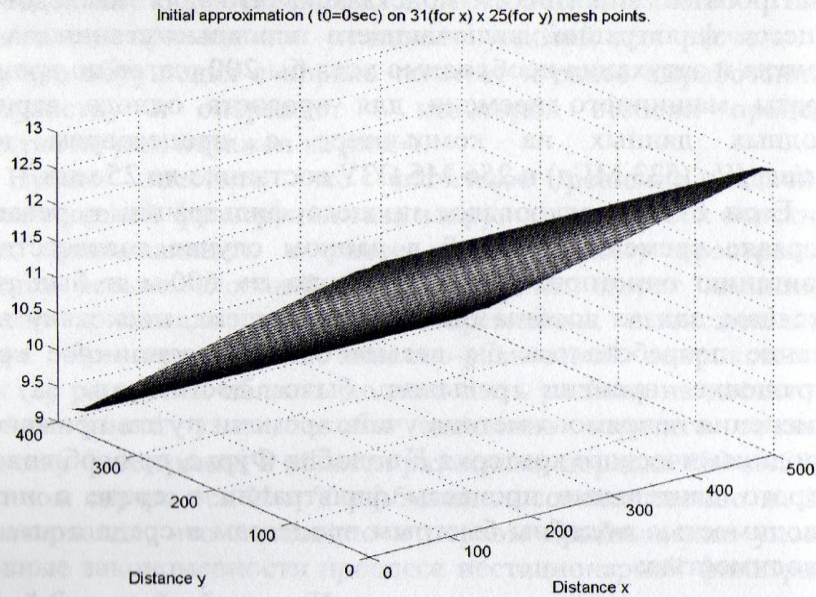


Рис. 5. Характеристика начального состояния системы

диффузии газа в сторону ранее отработанной площади. Таким образом давление на верхней границе принималось равным 9-10 МПа, на нижней 11-13 МПа при глубине залегания пласта 1200 м. В плоскости отработанного пласта остаточное давление газа плавно снижалось до 0,1 МПа.

При этом апробированы два варианта задания граничных условий. В первом случае давление газа задавалось только на границе расчетной области и в действующих выработках. Во втором варианте давление газа кроме этого задавалось на уровне плоскости ранее отработанного пласта.

В процессе решения задачи было испытано два подхода. При первом распределение газового давления определялось отдельно для каждого из восьми выделенных сечений независимо. При этом возникали трудности при задании граничных условий и особенно начальных состояний

моделируемой системы, что порождало неопределенности результатов решений и их несогласованность. Каждое сечение рассматривалось с самого начала временного интервала, что искажало результаты математического моделирования. На самом деле расчетное сечение переходило последовательно из позиции 1 в позицию 8, выделенные на рис. 4. При этом последующее решение должно зависеть от предыдущего распределения давления, достигнутого к концу предшествующего этапа сдвижений.

Именно такой подход и был реализован во втором подходе. Для этого была создана специальная вычислительная программа, которая меняла граничные условия и проводимость массива в зависимости от этапа сдвижений. Моменты перемены граничных сдвижений совпадают с моментами изменения горного давления, изображенные на графике рис. 2, б. Таким образом, впервые была решена задача нестационарного потока метана в анизотропном массиве осадочных горных пород с изменяющимися во времени и пространстве граничными условиями и свойствами среды. Именно такой подход дал возможность получить результаты моделирования, которые близки к данным, измеренным в натуральных условиях.

Результаты моделирования и их обсуждение.

На рис. 6 приведено перераспределение газового давления для варианта, когда граничные условия задавались только на внешних границах расчетной области. Предполагалось, что модель сама найдет правильное решение внутри области. На вертикальной оси графиков отложено давление газа в МПа, горизонтальные оси обозначают вертикальный и горизонтальный размеры расчетной области. Эта область повернута к зрителю так, что мы видим ранее выработанное пространство и почву (левый и нижний края расчетной области). Распределения давления газа соответствуют последовательным этапам сдвижений, которые на всех рисунках приведены слева направо и сверху вниз.

Видно, что вначале в результате отработки предыдущей лавы в левой части области в окрестности ее выработанного

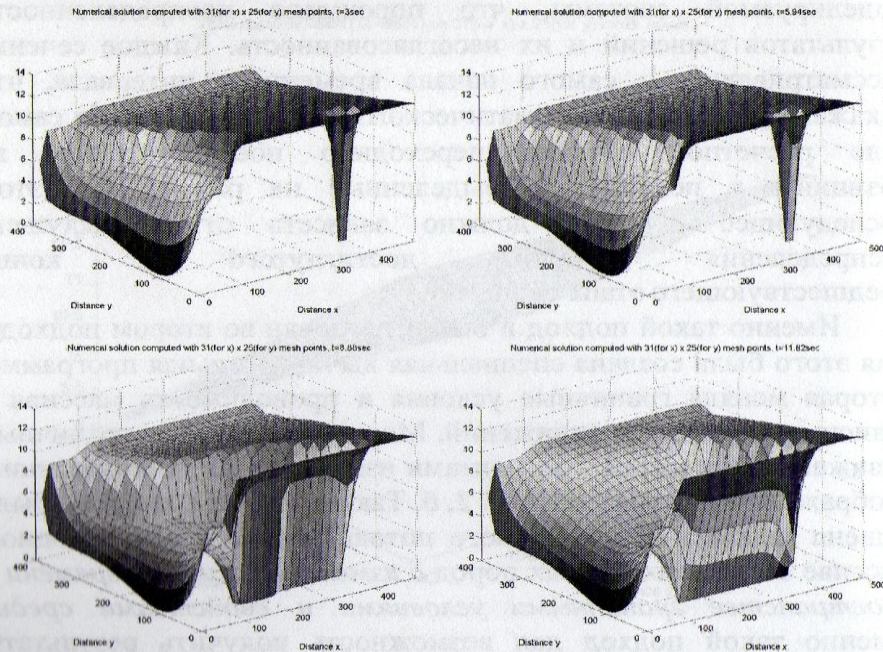


Рис. 6. Динамика газового тиску в околицях рухомої лави при заданні граничних умов тільки на границі розрахункової схеми

пространства образуется зона пониженного давления, обусловленная естественной дегазацией метана через трещины и расслоения в под- и надработанной толще (рис. 6, а). Падение газового давления отмечается также в окрестности конвейерного штрека, проходимого в 250 м от границы ранее выработанного пространства. С течением времени давление в ранее выработанном пространстве продолжает падать в силу естественной фильтрации метана через трещины, а также в результате развития зоны неупругих деформаций вокруг конвейерного штрека (рис. 6, б).

В результате отработки новой лавы и активных сдвижений зона пониженного давления развивается в только что над- и

подработанной толще (рис. 6, в). По мере развития сдвижений зона газовой разгрузки распространяется выше в подработанную и ниже в надработанную толщу (рис. 6, г).

Недостатком первого варианта задания граничных условий является то, что между новым и ранее выработанными пространствами образуется область повышенного газового давления в виде мостика-перемычки, который хорошо заметен и указан стрелкой на рис. 6, г. Такой результат не подтверждается данными натурных измерений газового давления и не может быть объяснен с учетом геомеханики процесса сдвижений массива в окрестности движущейся лавы. Причина такой погрешности расчета заключается в том, что повышенный уровень газового давления на нижней и верхней границах расчетной области вынуждает подтягиваться давлению к более высокому уровню даже в плоскости ранее отработанного пласта. Это значит, что нельзя оставлять этот участок без внимания и надеяться, что модель сама сможет без подсказки найти верное решение. Поэтому было принято решение задать на уровне почвы ранее отработанного пласта давление газа в явном виде граничных условий внутри расчетной области.

На рис. 7 приведены распределения потоков газа, которые в первом приближении совпадают по величине и направлению с градиентом давления. В силу сжимаемости газа давление и поток газа связан политропой, степень которой зависит от вида термодинамического процесса (изотермический, адиабатный, и т.п.). Количественные расчеты газовых потоков будут выполнены в отдельной работе. В данной статье излагаются предварительные результаты исследований. На рис. 7 градиенты направлены против потоков, поскольку стандартная программа вычисления градиента построена так, что она рисует стрелки в направлении увеличения давления, тогда как потоки газа ориентированы в обратном направлении. Подробнее распределения потоков газа будут анализироваться для случая, когда граничные условия задаются внутри расчетной схемы. В данном случае обратим лишь внимание на тот факт, что со стороны ранее выработанного пространства почти на всех

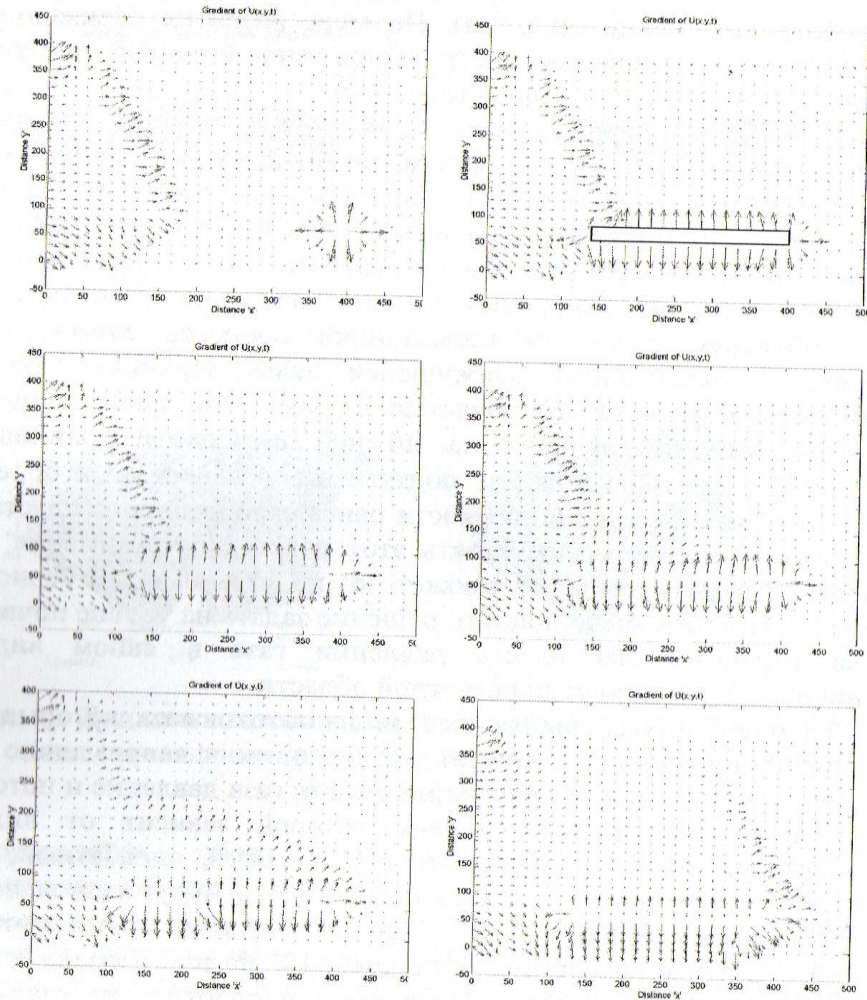


Рис. 7. Распределение газовых потоков по мере подвигания очистного забоя при первом типе граничных условий

распределениях наблюдается интенсивный поток газа в сторону вентиляционного штрека ($X=150$ м, $Y=80$ м), что противоречит экспериментальным фактам.

В связи с этим далее анализируются распределения

давления и поток газа для случая, когда граничные условия задавались внутри расчетной области. На рис. 8 показаны последовательные распределения давления. Видно, как с течением времени давления газа в окрестности ранее выработанного пространства падает и стремится к минимальному уровню (рис. 6, а, б). Однако по мере обрушения подработанной толщи над действующим очистным забоем и поднятия почвы, давление в ранее выработанном пространстве заметно увеличивается. Этот факт требует специального объяснения.

В процессе сдвижения толщи в окрестности действующего очистного забоя происходит увеличение ее трещиноватости и проводимости. Это, как видно на распределениях рис. 6, в и г,

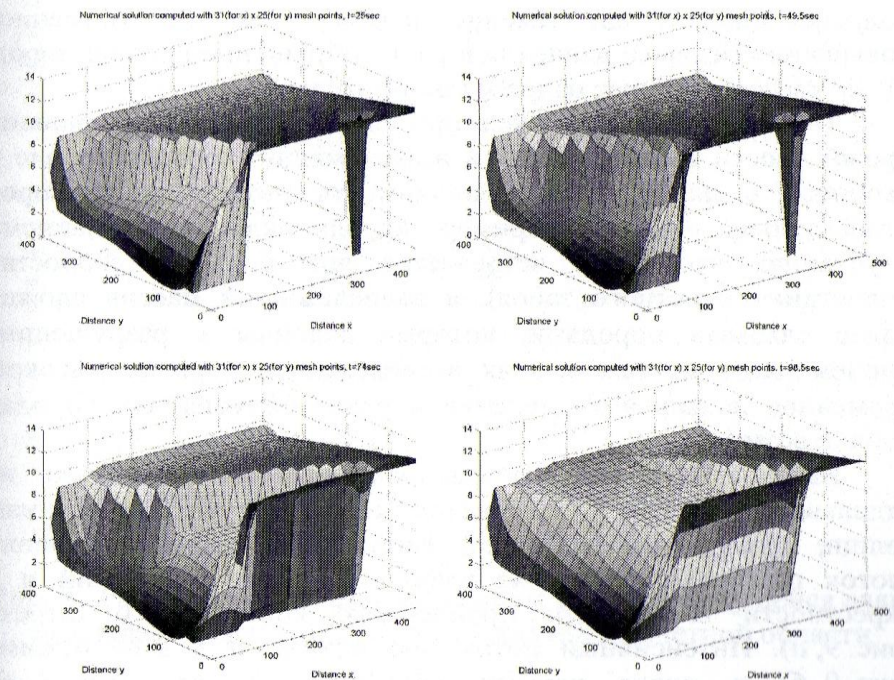


Рис. 8. Динамика газового давления при задании граничных условий внутри расчетной области

приводит к падению давления газа в под- и надработанной толще в результате интенсивной фильтрации газа в сторону выработанного пространства. Характерно, что это сопровождается временным увеличением давления в ранее выработанном пространстве в окрестности предыдущей лавы и в только что обрушенной толще в окрестности движущегося очистного забоя.

Можно предложить гипотезу, которая объясняет временное локальное повышение давления динамикой процесса газовыделения. В силу того, что давление газа в обрушающейся толще высокое, возникает интенсивный поток газа, который ранее обрушенный массив не в состоянии пропустить с той скоростью, с которой газ выделяется из только что подработанной толще. Именно поэтому возникает временное повышение газового давления в ранее обрушенной толще пород. То же касается и ранее надработанной толще.

Такой эффект возможен при определенном соотношении проводимости вышележащих и нижележащих пород в кровле и наоборот в почве. Если проводимость нижележащих пород относительно низкая (например, кровля склонна к плавному опусканию, что часто встречается при больших скоростях подвигания очистного забоя), а вышележащий массив сложен более слабыми породами, которые склонны к разрушению, причем давления газа в этих вышележащих породах высокое, временное повышение давления в ранее обрушенных породах вполне возможно.

На рис. 9 приведены распределения потоков газа на отдельных временных интервалах, соответствующих сечениям толще, приведенным на рис. 2. Видно, что градиент давления (поток газа) сохраняется на границе области сдвижений и в окрестности только что пройденного конвейерного штрека (рис. 9, а). Интенсивный поток газа возникает в зоне отжима (рис. 9, б) и после первого обрушения кровли (рис. 9, в). Последующие обрушения кровли приводят к меньшим перепадам давления и меньшей интенсивности газовыделения (рис. 9, г, д, е). Это согласуется с геомеханикой процесса

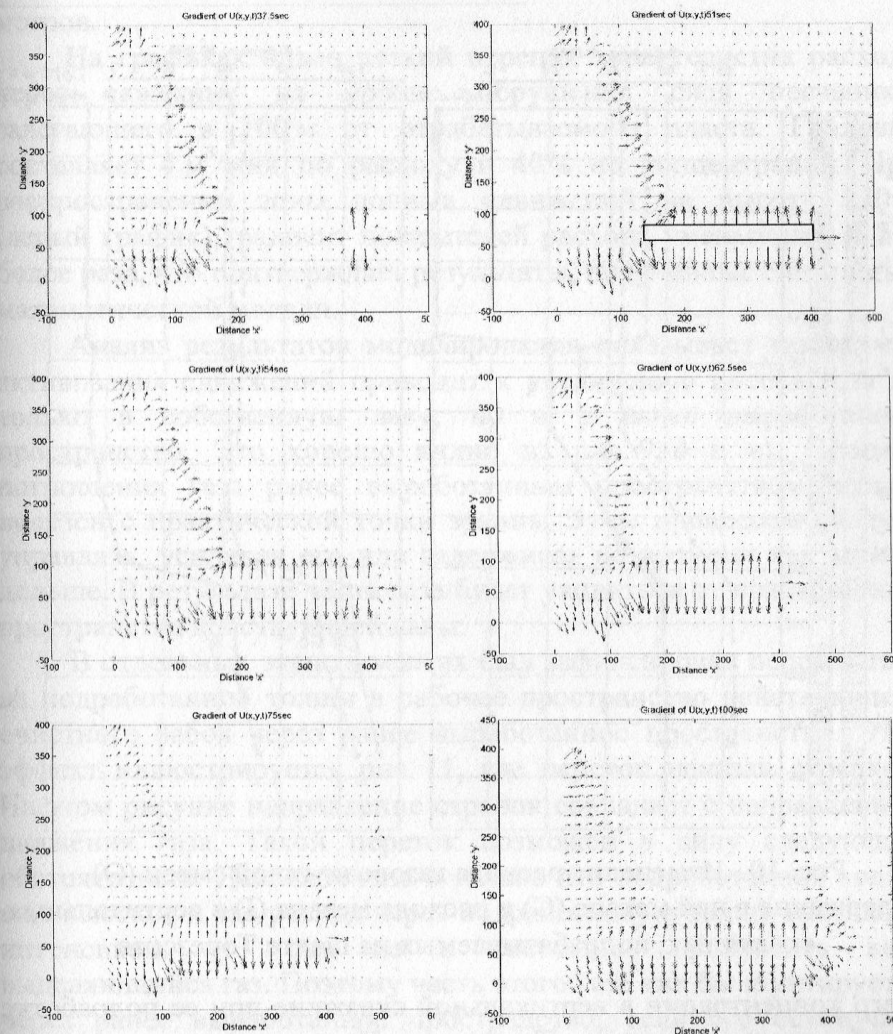


Рис. 9. Распределение газовых потоков вокруг движущейся лавы при задании граничных условий внутри расчетной области

сдвижений и подтверждается результатами измерения дебита метана через скважины

На рис. 10 показаны расходы газовой смеси, метана

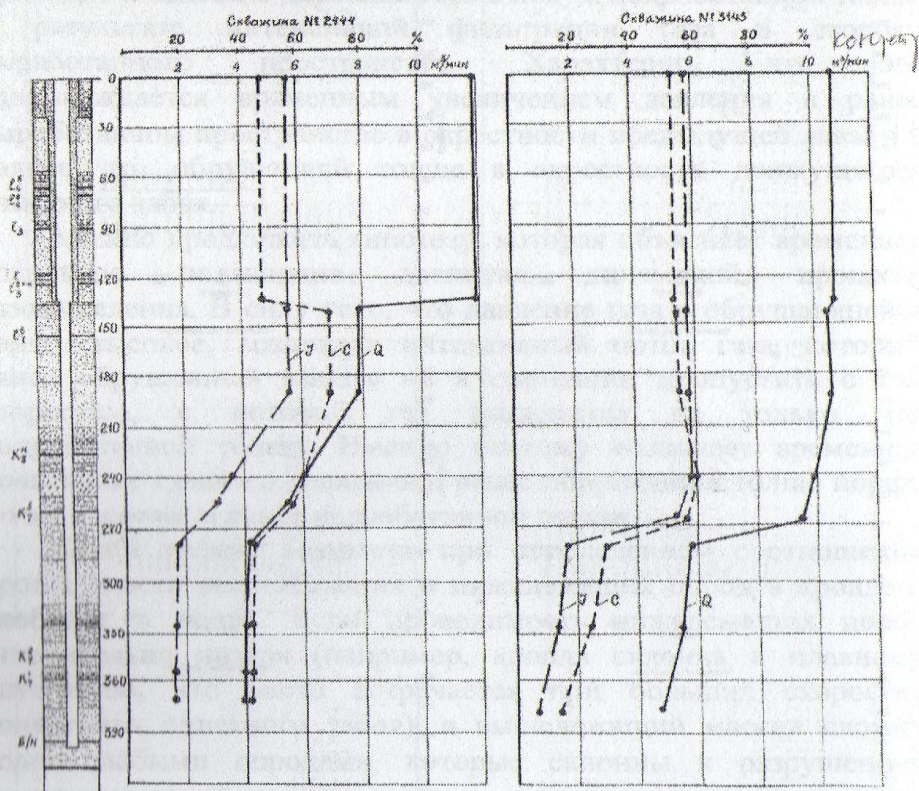


Рис. 10. Изменение расхода газозадушной смеси (Q), содержания в ней метана (C) и расхода метана (I) в вертикальных скважинах, подрабатываемых на шахте Торезская

и его концентрации в вертикальной скважине при ее подработке лавой в условиях шахты «Торезская». Измерения расхода газов в скважине производили с помощью добавок радиоактивного криптона, концентрацию которого прослеживали по длине скважины во времени по мере ее подработки очистным забоем. Правый график соответствует состоянию, когда скважина была только что подработана и очистной забой отошел от нее на небольшое расстояние, измеряемое несколькими десятками

метров.

На графиках виден резкий перепад характеристик расхода через скважину на уровне обрушения слоя песчаника, залегающего в 100 м от обрабатываемого пласта. Градиент составляет 4 м³/мин по расходу и 40% по концентрации. При распространении зоны полных сдвижений на высоту 250 м (левый график) градиент показателей расхода уменьшился в 2 и более раза, что подтверждает результаты, полученные с помощью математической модели.

Анализ результатов моделирования показывает также, что активизация сдвижений приводит к увеличению потока газа не только в собственную лаву, но и в ранее выработанное пространство. Это хорошо видно на рис. 9, д и е). Процесс поглощения газа ранее выработанным пространством весьма полезен с практической точки зрения. Этим процессом следует управлять, усиливая его или задерживая во времени как можно дольше. В результате часть газа будет уводиться от призабойного пространства действующей лавы.

В отдельных экспериментах был зафиксирован переток газа из подработанной толщи в рабочее пространство действующего очистного забоя через ранее выработанное пространство. Этот эффект иллюстрируется рис. 11, где переток показан стрелкой. На этом рисунке направление стрелок совпадает с направлением движения газа. Такой переток возможен в силу следующих обстоятельств. Давление газа в только что подработанной толще еще высокое и его расход через подработанную толщу настолько интенсивен, что она не в состоянии пропустить весь выделяющийся газ. Поэтому часть этого газа как бы шунтируется через ранее выработанное пространство, если его остаточная трещиноватость достаточно высока. В общем случае процесс перетока-шунтирования определяется соотношением проницаемости только что подработанной и ранее надработанной толщи, а также давлением газа в нетронутым массиве. Указанный эффект оказывает негативное влияние на газовую обстановку в районе сопряжения вентиляционного штрека с лавой и его следует подавлять.

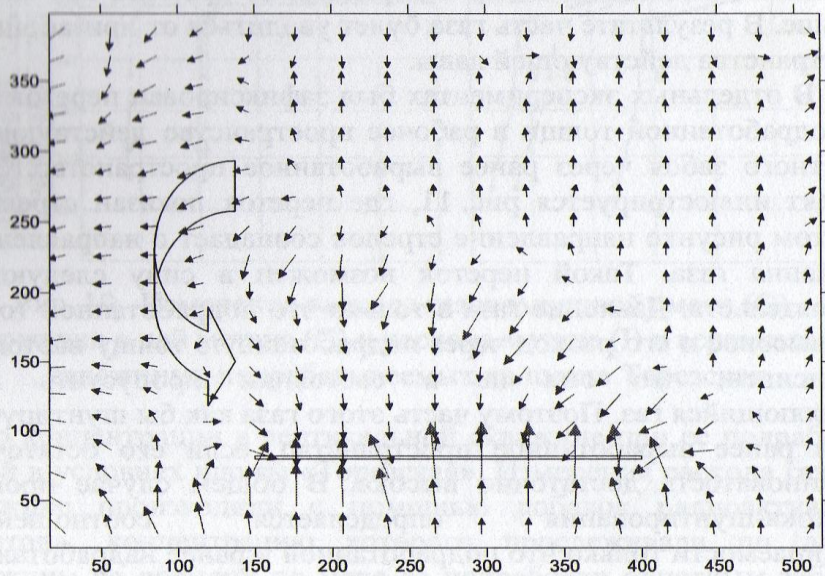
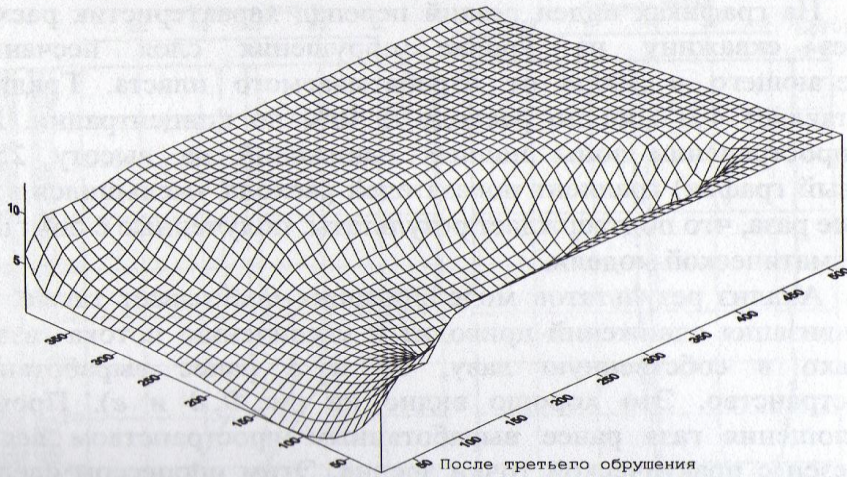


Рис. 11. Иллюстрация перетока газа через ранее выработанное пространство

Полученный с помощью математического моделирования эффект подтверждается данными измерения дебита газа через скважины, которые пересекают ранее выработанное пространство у границы с вентиляционным штреком. На рис. 12 приведен график расхода метана через скважину, которая была пробурена вдоль оси вентиляционного штрека с небольшим отклонением в сторону ранее выработанного пространства. График показывает, что после прохода лавы (положительные величины горизонтальной координаты) дебит метана увеличился более чем в два раза, что полностью согласуется с данными математического моделирования и свидетельствует об их достоверности.

Таким образом, выполненный анализ показал, что математическое моделирование нестационарной фильтрации газа в окрестности движущегося очистного забоя с переменными граничными условиями дает ценные данные для понимания этого

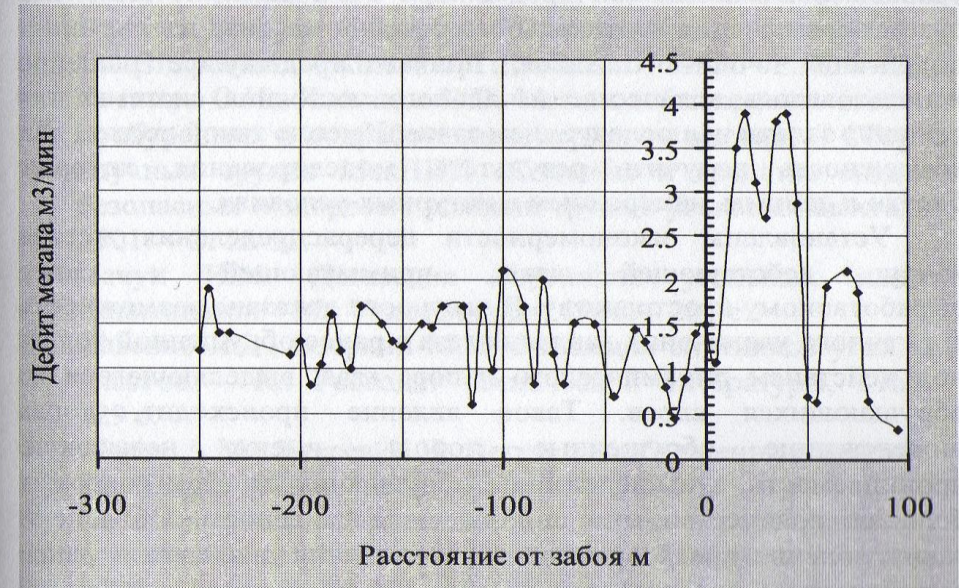


Рис. 12. Дебит метана в скважине, пробуренной по оси вентиляционного штрека 10-й западной лавы пласта l_1 шахты им. А.Ф. Засядько

сложного процесса. В частности установлено явление временного увеличения давления газа в ранее обрушенной толще под действием динамического напора газа, выделяющегося из вышерасположенных обрушающихся слоев. Результаты моделирования следует применять для обоснования рациональных параметров вентиляции и дегазации выемочных участков.

Дальнейшие исследования необходимо направить на развитие трехмерной нестационарной модели, поскольку процесс фильтрации метана имеет ярко выраженный пространственный характер.

Выводы.

Решена задача нестационарного потока метана в анизотропном массиве осадочных горных пород с изменяющимися во времени и пространстве граничными условиями и свойствами среды. При этом решение получено путем перемещения вертикального сечения массива вдоль линии подвигания очистного забоя, причем предыдущее решение использовалось в качестве начального состояния системы для решения задачи на последующем этапе. Именно такой подход дал возможность получить результаты моделирования, которые близки к данным, измеренным в натуральных условиях.

Установлены закономерности перераспределения метана вокруг действующей лавы, примыкающей к ранее выработанному пространству. В частности доказана возможность временного увеличения давления газа в ранее обрушенной толще под действием динамического напора газа, выделяющегося из обрушающихся слоев. Такое явление происходит, когда нижележащие обрушенные породы имеют невысокую проницаемость, а вышележащие обрушающиеся слои содержат большое количество газа под высоким давлением. Объяснено также явление кратковременного повышения давления в ранее выработанном пространстве за счет перетока через него части газа, поступающего из зоны активных сдвижений вокруг движущейся лавы. Впервые показано, что часть газа необратимо поглощается ранее подработанным массивом, что положительно

с точки зрения уменьшения эмиссии газа в действующий очистной забой.

Дальнейшее исследование закономерностей газовых потоков вокруг движущегося очистного забоя следует проводить с учетом трехмерного движения газа.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Касимов О.И., Кривицкий М.Д. и др. Эффективность дегазационных скважин, пробуренных с поверхности // Уголь Украины. – 1983. – С. 12-15.
2. Касимов О.И., Касьянов В.В., Буханцов А.И., Брюханов А.М. Добыча газа при дегазации шахт скважинами, пробуренными с поверхности // Экология и ресурсосбережение. – К.: Наукова думка. – 1994. – №1. – С. 20–23.
3. Kasimov O., Kasianov V. Coal Seam Methane Drainage Through Surface Borings // Interqas 95. Internationale Unconventional Gas Symposium. – Alabama: Tuscaloosa. – 1995. – P. 125–129.
4. Касимов О.И., Касьянов В.В. Метанодобычаемость скважин, пробуренных в подработанном породном массиве // Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». – 2001. – С. 23-32.
5. Печук И.М. Дегазация спутников угольных пластов скважинами. – М.: Углетехиздат, 1956. – 208 с.
6. Савенко Л.В., Озеркин М.И. Дегазация спутников угольных пластов. – К.: Госиздат технической литературы, 1963. – 129 с.
7. Морев А.М., Евсеев И.И. Дегазация сближенных пластов. – М.: Недра, 1975. – 135 с.
8. Касимов О.И. Эффективность схем проветривания и дегазации выемочных участков шахт Донбасса // Уголь. – 1986. – №4. – С. 17–19.
9. Шлёнбах М., Шэфер Г. и др. Состояние техники и технологии бурения подземных дегазационных скважин на

- каменноугольных шахтах земли Саар // Глюкауф. – 1998. – №2. – С. 62-69.
10. Касимов О.И., Бокий Б.В. Эффективность направленных дегазационных скважин большого диаметра // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ. – 2002. – №32. – С. 161-166.
 11. Мякенький З.И. Сдвигение и дегазация пород и угольных пластов при очистных работах. – К.: Наукова думка, 1975. – 97 с.
 12. Касимов О.И., Большинский Б.В., Ищенко П.И. Борьба с газовыделением из выработанных пространств при столбовой системе разработки // Уголь Украины. – 1983. – №1. – С. 8-11.
 13. Bise C., Sheetz R. Effects of coal seam permeability on the selection of a degasification scheme // Mining Engineering. – 1989. – №10, Vol.41. – P. 1035-1040.
 14. Юзеф Кабет. Обрушение кровли, сотрясение и метаноносность // Уголь Украины. – 2001. – №11-12. – С. 67-70.
 15. Касимов О.И., Бокий Б.В. Проектирование и эффективное применение дегазации выработанных пространств // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ. – 2003. – №42. – С. 31-35.
 16. Noak K., Koppe U., Kunz E. Control of high gas emission in underground coal mines // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. – Wollongong: WSU. – 1995. – P. 15-24.
 17. Tarnowsky J. Calculations concerning coal and gas outbursts // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. – Wollongong: WSU. – 1995. – P. 49-61.
 18. Ohga K., Higuchi K. Measurement of gas content prediction of gas emission from longwall panel // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. – Wollongong: WSU. – 1995. – P. 237-244.

19. Yi-Hong L. A feasibility study for achieving high output and high efficiency in highly gassy mines // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. – Wollongong: WSU. – 1995. – P. 245-250.
20. Enever J.R., Jeffrey R.G. Hydraulic fracture development in Australian coal seams // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. – Wollongong: WSU. – 1995. – P. 257-266.
21. Dunn B.W. Vertical well degasification in advance of mining // Int. Symp. on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. – Wollongong: WSU. – 1995. – P. 267-276.
22. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М-Л.: Гостехиздат, 1947. – 244 с.
23. Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971. – 452 с.
24. Аэрология горных предприятий / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.Н. Пучков, И.И. Медведев / Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
25. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. 2-е изд. – М.: Научный мир, 2003. – 316 с.

Здано до редакції 02.04.04 р.
Рекомендовано до друку д.т.н. Софійським К.К.