

**Круковская В.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ,  
ПРОИСХОДЯЩИХ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ ПРИ  
ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ**

**Круковська В.В.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.  
(ИГТМ НАН України)

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО  
ВІДБУВАЮТЬСЯ У ВУГЛЕПОРОДНОМУ МАСИВІ ПРИ  
ВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ РОБІТ**

**Krukovskaya V.V.**, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

**SIMULATION OF COUPLED PROCESSES OCCURRED IN COAL-  
ROCK MASSIF DURING MINING OPERATIONS**

**Аннотация.** В работе исследуется взаимосвязь деформационных, диффузионно-фильтрационных и других физических процессов, происходящих в углепородном массиве при различных технологических воздействиях.

Предложен комплекс математических моделей и расчётных методов, позволяющих объединить в связанную систему несколько физических процессов, происходящих в углепородном массиве при различных технологических воздействиях, и моделировать сложные процессы геомеханики. Установлен критерий оценки степени влияния каждого из связанных процессов на изменение массивов общих параметров для определения необходимости их учёта в соответствующих математических моделях. Показано, что пренебрежение некоторыми процессами при математическом моделировании сложных физических процессов приводит к ошибкам, достигающим 250 %.

Разработаны математические модели и методы расчёта параметров связанных процессов «деформирование массива с анкерной крепью – фильтрация метана», «деформирование массива с анкерной крепью – фильтрация метана – действие взрыва», «изменение напряжённого состояния массива в забое выработки – фильтрация метана – десорбция метана» при газодинамических процессах, «изменение напряжённого состояния массива в забое выработки – двухфазная фильтрация жидкости и газа» при нагнетании жидкости в угольный пласт. На основе разработанных моделей установлены пространственно-временные закономерности изменения параметров указанных связанных процессов.

**Ключевые слова:** связанные процессы, напряженно-деформированное состояние углепородного массива, фильтрация флюидов, газодинамические явления, анкерное крепление, взрывное воздействие.

**Введение**

Совершенствование существующих и создание новых технологий проведения и крепления горных выработок, дегазации и добычи метана, обеспечения безопасности ведения горных работ требует решения ряда задач, связанных с одновременным учётом нескольких физических и технологических процессов. Такими процессами являются: изменение напряженно-деформированного состояния массива, его упрочнение с помощью крепи, фильтрация и диффузия га-

за и воды, генерация и десорбция метана, взрывное воздействие, процессы теплообмена, гидровоздействие на угольный пласт. Деформирование массива горных пород среди этих процессов является основным, влияющим практически на все остальные, поэтому под термином «связанные процессы геомеханики» будем понимать изменение напряжённо-деформированного состояния и связанные с ним физические и технологические процессы, происходящие в углепородном массиве при ведении горных работ.

С момента осмысления проблемы численного решения связанных задач в начале девяностых годов происходили попытки объединить вычислительные ресурсы между различными областями моделирования. С помощью конечно-элементных программ решены отдельные связанные задачи в различных областях науки, в том числе геомеханики. Однако существующие методы расчёта геомеханических, фильтрационных и других параметров не дают ответа на вопросы, как объединить все происходящие процессы в единую систему, какими из них и когда можно пренебречь для упрощения задачи, каков критерий оценки степени влияния каждого из происходящих в исследуемой области процессов на изменение массивов их общих параметров. Проблемы совместного моделирования связанных физико-механических и технологических процессов, происходящих в породном массиве при ведении горных работ на угольных шахтах, решены не в полной мере, не исследованы закономерности совместного протекания многих связанных процессов геомеханики. Поэтому для всестороннего исследования сложных процессов геомеханики, совершенствования технологий угледобычи, повышения эффективности и безопасности горных работ необходимо развитие теории связанных физико-механических процессов, происходящих в углепородном массиве при различных технологических воздействиях, которое заключается в разработке математических моделей и методов расчёта параметров новых сочетаний связанных процессов геомеханики, установлении закономерностей их совместного протекания.

### **1 Анализ современных представлений об исследовании сложных физических процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ**

Применяемые в настоящее время и разрабатываемые технологии горного производства (проведения и крепления горных выработок, обеспечения их устойчивости, дегазации газонасыщенного массива, добычи метана и обеспечения безопасности ведения горных работ) базируются на всестороннем исследовании происходящих в углепородном массиве физических процессов. Часто для этого необходимо рассматривать несколько процессов одновременно, рисунок 1.

Впервые связанные процессы гидродинамики и механики грунтов отражены в теории консолидации грунтов (К. Terzaghi), позднее – в теории изотермической консолидации упругой пористой среды (М.А. Biot). Тема связанных задач вызвала активные исследования благодаря её значению для различных областей науки: многофазные потоки и массоперенос в пористых средах для нефте-, газодобычи и экологических инженерных приложений; сочетание ис-

следования НДС, движения флюидов и теплообмена в трещиноватых породах применительно к захоронению ядерных отходов, изменение проницаемости при движении флюидов в породе; влияние химических изменений на механическую прочность и другие свойства



Рисунок 1 – Проблемы горного производства, требующие исследования связанных физических процессов

бетона и глинистых материалов; влияние порового давления газа на НДС.

Среди задач геомеханики значительный интерес представляет моделирование фильтрации подземных вод в нарушенных горных породах. Область их применения включает проблемы устойчивости откосов, подземных выработок и конструкций. В последнее время наблюдается всплеск активности в этой области из-за повышенного интереса к решению связанных задач, имеющих отношение к нефтяной промышленности. Движение жидкости сильно связано с деформацией породы в результате различных видов и режимов нагружения и разгрузки, в том числе и под действием давления жидкости, находящейся в трещинно-поровом пространстве твёрдого тела.

Развитие надёжных численных методов решения таких задач является важным и своевременным для современной вычислительной геомеханики. Решение связанных задач механики твёрдого тела и фильтрации жидкости основано на уравнениях равновесия, непрерывности, соотношениях упругости и закона Дарси. В результате решения находятся четыре отдельные категории неизвестных: перемещения, напряжения, давления и скорости движения жидкости. Каждые из этих неизвестных аппроксимируются линейными непрерывными функциями.

Связанные модели термо-гидро-механики были разработаны в соответствии с двумя основными связанными механизмами – взаимодействия между полями напряжений и температур через термические напряжения и расширение и взаимодействие между полями деформаций и проницаемости пористой среды. Они основаны на законах упругости Гука, фильтрации в пористой среде Дарси и теплопроводности Фурье. Постановка задачи включает три взаимосвязанных дифференциальных уравнения в частных производных, выражающие сохранение массы, энергии и импульса для описания взаимодействия между процессами фильтрации жидкости, теплообмена и деформирования. Однако

связи между процессами изменения НДС, теплопереноса, фильтрации флюидов и другими, происходящими в углепородном массиве, понятны не до конца.

На основе механики твёрдого тела и газовой динамики разработаны модели связанных процессов упругопластической деформации угля и фильтрации метана. Метан в угольных пластах является важным природным ресурсом энергии, хотя его возгорания и взрывы представляют серьёзную опасность и остаются серьёзной проблемой во время добычи угля и при ведении других горных работ. Неповреждённый уголь является гетерогенным геологическим материалом, который содержит естественные ослабления, трещины в различных масштабах. Когда начинается извлечение метана, эти уже существующие трещины могут закрыться, открыться, расшириться или образовать новые трещины. Проницаемость угля в различных теориях описывается как функция от изменения НДС либо со статистической точки зрения.

Исследована кинетика массопереноса метана в угле при десорбции путём моделирования связанных процессов фильтрации газа в трещинно-поровом пространстве и притока газа в фильтрационный объём из закрытых пор.

Решены совместные уравнения фильтрации жидкости и деформации пористой среды, которые моделируют гидроразрыв угольного пласта путём нагнетания в пласт воды через скважину.

Проводились исследования процесса разрушения бетона на трёхфазных моделях, которые учитывают кинетику химических реакций в зависимости от температуры и влажности, а также давление набухания со стороны продуктов химических реакций на скелет.

Для моделирования действия взрыва, вызывающего в твёрдой среде обширное разрушение, решены связанные задачи газовой динамики и механики твёрдого тела. Они реализованы при помощи комбинированного метода конечных и дискретных элементов. Взрыв – это физическое явление, которое обычно считается слишком сложным для аналитических методов исследования, поэтому многие предпочитают эмпирические подходы для его изучения. Однако используются и численные решения задач динамики разрушения горных пород взрывом. Конечноэлементная дискретизация позволяет учитывать сложную форму геометрически и материально нелинейных деформируемых дискретных элементов в связанной модели взаимодействия газа и твёрдого тела. Эта модель используется для оценки пространственного распределения давления газообразных продуктов детонации.

К недостаткам существующих математических моделей связанных процессов можно отнести отсутствие анализа степени влияния процессов на общий результат; отсутствие критериев оценки степени влияния процессов на результат расчёта. Часто в расчётных схемах отсутствует реальная среда, которая является необходимым условием возникновения и протекания нестационарных процессов с её слоистостью, тектоническими нарушениями, выработками определённой формы, крепью и т.д. Зачастую моделирование проводится в стационарной постановке. Очень мало приложений механизма моделирования связан-

ных процессов к проблемам геомеханики газо- и водонасыщенного массива при условии одновременного протекания различных технологических процессов.

## **2 Математическое моделирование связанных процессов, происходящих при подземной добыче угля**

В качестве одного из основных методов теоретического исследования сложных прикладных проблем в настоящее время всё чаще используется вычислительный эксперимент. Суть этого метода состоит в том, что на основе математической модели в результате непосредственного численного решения соответствующих уравнений количественно определяется поведение изучаемого объекта в тех или иных условиях [1]. Сравнение результатов расчётов с имеющимися экспериментальными данными позволяет оценить эффективность математической модели, определить необходимые константы и добиться её адекватности рассматриваемому явлению. На основе прошедшей такую проверку модели можно прогнозировать поведение исследуемого объекта в условиях, недостижимых в натурном эксперименте.

Основными процессами, происходящими в горных породах при подземной добыче угля являются: изменение НДС твёрдого тела; диффузия жидкости и газа; фильтрация жидкости и газа; сорбция (десорбция) газа; взрывное воздействие; теплоперенос; химические процессы.

**Изменение напряжённо-деформированного состояния твёрдого тела во времени.** При моделировании принимается гипотеза сплошности, горный массив считается однородным в пределах каждого породного слоя. Суммарная сила, действующая на каждую точку тела, в общем случае равна сумме сил геостатического давления, давления газа, напряжений от взрывной волны, если учитывается воздействие взрывных работ, и т.д.

Изменение во времени напряжённо-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки без учёта сил инерции описывается системой уравнений [2]:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ , МПа/м;  $X_i(t)$  – проекции внешних сил, действующих на единицу объёма твёрдого тела, Н/м<sup>3</sup>;  $T_i(t)$  – проекции сил, вызванных внутренним трением, действующих на единицу объёма тела, Н/м<sup>3</sup>;  $P_i(t)$  – проекции сил, обусловленных давлением флюидов в трещинно-поровом пространстве, Н/м<sup>3</sup>,  $P_i = \partial p / \partial x_i$ ;  $p$  – давление жидкости или газа, МПа.

С учётом сил инерции:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = \rho_s \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right),$$

где  $\rho_s$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $u_i$  – перемещения, м.

Силы  $T_i(t)$  пропорциональны скорости изменения перемещений:

$$T_i(t) = -c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i, \quad (2)$$

где  $c_g$  – коэффициент демпфирования, кг/с/м<sup>3</sup>.

В матричной форме дифференциальное уравнение (1) с учётом (2) можно записать в виде:

$$[K_g]\{U\} + [C_g] \frac{\partial}{\partial t} \{U\} + \{F_g\} = 0, \quad (3)$$

где  $[K_g]$  – матрица жёсткости;  $\{U\}$  – вектор узловых перемещений;  $[C_g]$  – матрица демпфирования;  $\{F_g\}$  – вектор усилий в узлах.

Для задач в динамической постановке имеем [2]:

$$[M_g] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{U\} + [C_g] \frac{\partial}{\partial t} \{U\} + [K_g] \{U\} + \{F_g\} = 0,$$

где  $[M_g]$  – матрица масс.

В качестве начальных условий для поставленной задачи задаются:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H, \end{aligned}$$

где  $\gamma$  – усреднённый вес вышележащих горных пород, Н/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора.

Граничные условия:

$$u_x|_{\Omega_1} = 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0;$$

где  $\Omega_1$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_2$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Суммарная сила  $\{F_g\}$ , приложенная в узлах рассматриваемой области, равна сумме сил, обусловленных действием геостатического давления  $\{F_0\}$ , взрывной волны, если необходимо,  $\{F_b\}$  и давления газа  $\{F_p\}$ , которое определяется путём решения нестационарной задачи фильтрации метана в трещиновато-пористой деформируемой среде, проницаемость которой изменяется во времени:  $\{F_g\} = \{F_0\} + \{F_b\} + \{F_p\}$ .

Полученная система матричных уравнений (3) решается с помощью итерационного метода сопряжённых градиентов, при котором производится согласование невязок, возникающих в результате подстановки пробных решений в исходные алгебраические уравнения. По найденным перемещениям определяются напряжения:  $\{\sigma\} = [D_g][B]\{u\} + \{\sigma_0\}$ .

Чтобы получить решение на определённом временном промежутке, применяется конечно-разностный метод, согласно которому для достаточно малых  $\Delta t$  можно записать соотношение:

$$\left( [K_g] + \frac{2}{\Delta t} [C_g] \right) \{U\}_{t+\Delta t} = \left( \frac{2}{\Delta t} [C_g] - [K_g] \right) \{U\}_t - \left( \{F_g\}_t + \{F_g\}_{t+\Delta t} \right). \quad (4)$$

Считая, что на момент времени  $t$  распределение напряжений задано, для достаточно малых значений  $\Delta t$  получаем распределение напряжений на момент времени  $t + \Delta t$ . Этот процесс продолжается от момента времени  $t = 0$  до любого текущего момента времени.

Задача решается в упругопластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения в результате и сдвига, и отрыва.

Для анализа напряжённо-деформированного состояния породного массива в работе используются геомеханические параметры

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H},$$

характеризующие разнокомпонентность поля напряжений, и

$$P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma H},$$

характеризующий разгрузку массива от горного давления.

**Неустановившаяся диффузия жидкости.** Для построения математической модели приняты следующие допущения: диффузионный поток будем считать изотермическим, жидкость – несжимаемой.

Первый закон Фика, описывающий изменение плотности диффузионного потока, для плоской задачи имеет вид:

$$J_x = -D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad J_y = -D \frac{\partial c}{\partial y},$$

где  $J_x, J_y$  – плотность диффузионного потока в направлении осей  $x$  и  $y$ , см/с;  $D$  – коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;  $c$  – концентрация вещества в поровом пространстве, %.

Второй закон Фика для плоского случая учитывает изменение концентрации вещества во времени:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right).$$

Принимая во внимание возможность химического взаимодействия веществ, растворённых в жидкости, и компонент твёрдой среды и то, что коэффициенты диффузии могут быть непостоянными, можно записать:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( d_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( d_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + g(t), \quad (5)$$

где  $d_x, d_y$  – коэффициенты диффузии в направлении осей координат,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $g(t)$  – функция поглощения (выделения) влаги в результате химического взаимодействия, которую можно представить в виде:

$$g(t) = g_0 e^{-at},$$

$g_0$  – начальное количество выделившейся воды;  $a$  – коэффициент, учитывающий пористость и проницаемость;  $t$  – время, прошедшее с момента начала реакции.

Путём минимизации функционала, связанного с уравнением (5), оно может быть преобразовано к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$[C_d] \frac{\partial \{C\}}{\partial t} + [D] \{C\} + \{F_d\} = 0, \quad (6)$$

где  $\{C\}$  – узловые значения концентрации вещества;  $[D]$  – матрица диффузионной проницаемости элемента;  $[C_d]$  и  $\{F_d\}$  в пределах каждого элемента определяются из соотношений:

$$[c_d] = \int_s \frac{\mu}{\rho} [N]^T [N] dS; \quad [f_d] = \int_s Q [N]^T dS,$$

$\mu$  – вязкость жидкости или газа, Пас;  $\rho$  – плотность жидкости или газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Решение системы уравнений (6) аналогично представленному ранее.

**Неустановившаяся фильтрация газа.** Приняты следующие допущения: диффузионный поток будем считать изотермическим, непрерывным.

При малых скоростях фильтрации флюидов (в ламинарном режиме) движение потока подчиняется закону Дарси:

$$v_x = k_x \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k_y \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (7)$$

где  $v_x, v_y$  – компоненты вектора скорости фильтрации;  $k_x, k_y$  – коэффициенты проницаемости твёрдого тела, мДа;  $p$  – давление газа, МПа.

Но при изучении некоторых динамических процессов, в некоторые моменты времени скорость может и не удовлетворять этому условию. В случае турбулентности необходимо учитывать зависимость между градиентом давления и более высокими степенями скоростей течения, и их также можно записать в виде (7) [2], если  $k = k(\bar{v})$



$$v_x = k(\bar{v}) \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k(\bar{v}) \frac{\partial p}{\partial y}.$$

Уравнения неразрывности газового потока в плоской постановке при наличии источника газовой выделении и без учёта сжимаемости можно представить в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t). \quad (8)$$

где  $q(t)$  – функция газовой выделении.

Начальные условия и граничные условия:

$$p|_{t=0} = p_0, \quad p|_{\Omega_1(t)} = p_0; \\ p|_{\Omega_2} = p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа},$$

где  $p_0$  – давление в момент времени  $t = 0$ , МПа;  $\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка).

Путём минимизации функционала, связанного с уравнением (8), оно может быть преобразовано к следующей системе дифференциальных уравнений [3]:

$$[C_f] \frac{\partial \{P\}}{\partial t} + [K_f] \{P\} + \{F_f\} = 0, \quad (9)$$

где (в пределах каждого элемента) матрицы  $[c_f]$ ,  $[k_f]$  и вектор  $\{f_f\}$  равны:

$$[c_f] = \int_S \frac{\mu}{\rho} [N]^T [N] dS, \quad [k_f] = \int_S [B_f]^T [D_f] [B_f] dS, \quad [f_f] = \int_S q [N]^T dS. \quad (10)$$

**Двухфазная фильтрация жидкости и газа.** В то время как для описания однофазной фильтрации достаточно единственной зависимой переменной давления  $p$  или насыщенности  $s$ , для многофазной фильтрации нужны обе переменные и дополнительные соотношения [4]:

$$P_c = p_g - p_w = f(S_w); \\ s_w + s_g = 1;$$

где  $P_c$  – давление в трещинно-поровом пространстве, МПа.

В приведённых уравнениях индексы «и» и «г» обозначают соответственно жидкую и газообразную фазы.

В трёхкомпонентной среде «твёрдое тело – газ – вода» подвижные компоненты (газ и вода) перемещаются совместно в трещинно-поровом пространстве твёрдого тела, имеющего определённую, зависящую от соотношения ком-

понент тензора главных напряжений, абсолютную проницаемость. Автором было показано [5], что

- в нетронутом горном массиве  $k = 0$  при  $Q^* < 0,6$ ;
- в зоне упругих деформаций и равнокомпонентного сжатия  $k = 0$  при  $Q^* < 0,7$ ;  $P^* > 0,25$ ;
- в области начального и интенсивного трещинообразования  $k = k_{\min}$  при  $0,7 < Q^* < 0,8$  и  $k = e^{0,26Q^*-4,65}$  (или  $k = e^{\frac{2,58(\sigma_1(t)-\sigma_3(t))}{\sigma_2(t)}-4,65}$ ) при  $Q^* > 0,8$ ;
- в области разрушения горных пород  $k = k_{\max}$ , при  $P^* < 0,1$ ;  $Q^* > 0,8$ .

То есть

$$\left\{ \begin{array}{l} k = 0 \text{ при } Q^* < 0,6; \\ k = 0 \text{ при } Q^* < 0,7; P^* > 0,25; \\ k = k_{\min} \text{ при } 0,7 < Q^* < 0,8; \\ k = e^{0,26Q^*-4,65} \text{ при } Q^* > 0,8; P^* > 0,1; \\ k = k_{\max} \text{ при } Q^* > 0,8; P^* < 0,1. \end{array} \right. \quad (11)$$

Абсолютная проницаемость  $k$  рассматривается как величина, характеризующая фильтрационную способность твёрдой фазы, где подвижная фаза занимает всё свободное пространство. Когда в трещинно-поровой среде присутствуют несколько подвижных фаз, термин «проницаемость» должен быть связан с каждой отдельной фазой. Фазовую, относительную, проницаемость удобно выразить в долях абсолютной проницаемости [6]:  $k = k_w + k_g = 100\%$ .

**Взрывное воздействие.** В момент взрывания шпуровых зарядов в забое выработки в массиве начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее, изменяющееся во времени под действием внешних сил и сил, обусловленных давлением газа в трещинно-поровом пространстве, поле напряжений  $\sigma_{ij}$  дополнительные напряжения  $\sigma_{ij}^e$ , вызванные взрывом:  $\sigma_{ij}^{\text{полн}} = \sigma_{ij} + \sigma_{ij}^e$ .

Для расчёта радиальной  $\sigma_r(r, t)$  и тангенциальной  $\sigma_\phi(r, t)$  составляющих волны напряжений при взрыве сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний  $r = (20 \div 100)R_0$ , где  $R_0$  – радиус заряда будем использовать эмпирические соотношения В.А. Боровикова и И.Ф. Ванягина [7] для крепких горных пород.

Когда волна сжатия подходит к открытой поверхности забоя, она отражается от неё, превращаясь в волну растяжения, центром которой является точка, симметричная центру взрыва относительно поверхности забоя.

Для моделирования действия взрыва необходимо задать давление газов  $p_0$ , образующихся в результате химических превращений, в области взрыва. Давление на стенки шпура  $p_0 = p_d/2$ , где  $p_d$  – детонационное давление.

**Объединение нескольких процессов в связанную систему.** Обычно при ведении горных работ в газо- или водонасыщенном углепородном массиве происходит протекание не одного, а двух или нескольких сразу, взаимно влияю-

щих процессов, и чтобы найти распределение искомым величин, необходимо решить связанную систему из двух или нескольких дифференциальных уравнений. Практически в любом случае это будет связанная система II-го класса, так как все эти процессы происходят в одной и той же области – области нарушенного ведением горных работ углепородного массива.

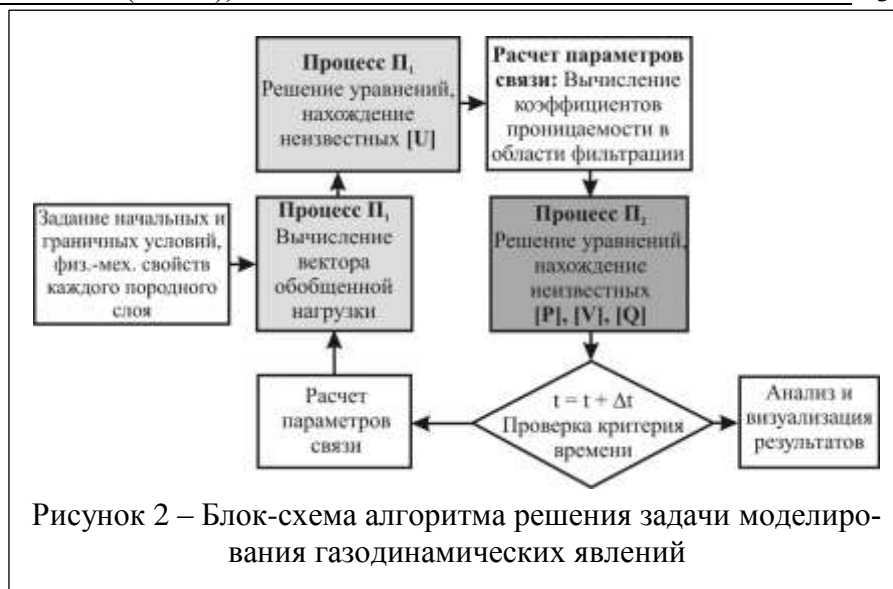
Если процесс  $P_2$  начинается после окончания  $P_1$  они описываются уравнениями в стационарной постановке. Связь между ними осуществляется через некоторые параметры – параметры связи – посредством которых процесс  $P_1$  влияет на протекание процесса  $P_2$ . В качестве примера можно привести развитие геомеханических и фильтрационных процессов вокруг выработки, проводимой в газонасыщенном массиве, с анкерной крепью. В данном случае рассчитывается сначала поле напряжений, затем проницаемость массива в качестве параметров связи, затем – фильтрационные параметры.

Если процессы  $P_1$  и  $P_2$  протекают одновременно, их моделирование можно проводить только с учётом фактора времени, рассчитывая на каждой временной итерации параметры связи между  $P_1$  и  $P_2$ . На каждой временной итерации вплоть до интересующего нас момента времени вычисляются последовательно параметры первого процесса, параметры прямой связи, параметры второго процесса, параметры обратной связи. Если в общем процессе участвует более двух связанных процессов, они также подключаются к замкнутой цепочке расчёта с обязательным учётом параметров связи с другими процессами. Примером такой пары процессов может служить фильтрация воды при оттаивании мёрзлых пород вокруг выработки, проведённой в условиях криолитозоны. Так как температура воздуха в выработке положительная, происходит постепенное оттаивание приконтурных пород – процесс  $P_1$ . Со временем граница таяния отодвигается от контура выработки и внутри этой зоны в разгруженных от горного давления областях с достаточной проницаемостью начинается фильтрация оттаявшей воды из массива в выработку – процесс  $P_2$ .

**Алгоритмы и блок-схемы решения основных связанных задач геомеханики.** *Изменение напряжённо-деформированного состояния и нестационарная фильтрация метана при развязывании и протекании газодинамических явлений.* Процесс выброса угля (породы) и газа происходит в условиях стремительно развивающейся проницаемости, которая зависит от характера изменения напряжённого состояния среды и давления газа в её порах и пустотах. С другой стороны, существует и обратная связь: изменение давления газа и его десорбции зависят от газопроницаемости. Эта двусторонняя зависимость существенно влияет на процесс течения газа в трещиновато-пористой среде и, в частности, на возникновение и протекание процесса выброса угля (породы) и газа. Поэтому для моделирования геомеханических и фильтрационных процессов при протекании выброса угля и газа в забое выработки, проводимой по выбросоопасному угольному пласту, необходимо провести расчёт параметров связанных процессов:

– изменения во времени НДС массива в забое одиночной горной выработки под действием силы тяжести;

- нестационарной фильтрации газа в нарушенном массиве с учётом изменения во времени, в зависимости от напряжённого состояния, границы области фильтрации и проницаемости внутри неё.
- выделение метана в трещинно-поровое пространство в результате десорбционных, химических или других процессов, которое учитывается заданием соответствующей функции в источниковом члене уравнения фильтрации (8).



Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рис. 2.

При построении блок-схемы использовались следующие обозначения: процесс  $\Pi_1$  – изменение НДС массива под действием силы тяжести; процесс  $\Pi_2$  – фильтрация газа в нарушенном массиве с учётом его десорбции или физико-химической генерации.

Изменение напряжённо-деформированного состояния и двухфазная фильтрация жидкости и газа при нагнетании жидкости в угольный пласт. Горный массив на больших глубинах практически непроницаем. Но при проходке выработки и бурении скважины в её забое происходит перераспределение поля напряжений, связанное с разгрузкой вмещающего массива от горного давления. Вокруг образованных полостей развивается система трещин, образуя область фильтрационной проницаемости, в которой под действием перепада давлений метан движется из глубины угольного массива к поверхности скважины и выработки.

Во время гидроимпульсного воздействия закачиваемая в скважину жидкость перемещается вглубь пласта, оттесняя метан. При достаточно высоком давлении воды происходит увеличение трещиноватости и расширение области фильтрации (области гидровоздействия). Влага проникает далеко вглубь пласта, смачивая внутреннюю поверхность трещинно-порового пространства и перекрывая мелкие трещины для движения газа. После сброса давления жидкости в скважине большая часть воды уходит и вновь начинается процесс фильтрации метана в расширившейся области фильтрации вокруг незагерметизированной части скважины.

Таким образом, для моделирования геомеханических и фильтрационных процессов при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт необходимо провести расчёт параметров связанных процессов изменения во времени НДС массива в забое одиночной горной выработки под действием силы тяжести и

двухфазной нестационарной фильтрации жидкости и газа в нарушенном массиве с учётом изменения во времени положения границы области фильтрации и проницаемости внутри неё, рис. 3.

На каждой временной итерации рассчитывается:

- поле напряжений;
- поле коэффициентов проницаемости в зависимости от параметров напряжённого состояния углеродного массива;
- насыщенность трещинно-порового пространства водой  $S_w$  и область гидроимпульсного воздействия (область фильтрации воды из шпура);
- поле коэффициентов газовой проницаемости  $K_g = K(\sigma_{ij}) - S_w$ ;
- параметры фильтрации метана.

Моделирование гидровоздействия в импульсном или статическом режиме осуществляется посредством приложения соответствующей нагрузки в узлах незагерметизированной части скважины на нужных временных итерациях.

*Диффузия, изменение напряжённо-деформированного состояния и фильтрация воды в шахтных железобетонных конструкциях.* Рассмотрим процессы, происходящие при транспортировке шахтных вод по заглублённым гидротехническим сооружениям к прудам-отстойникам.

Для моделирования изменения состояния заглублённых конструкций шахтных гидротехнических сооружений и вмещающего грунта в течение времени эксплуатации необходимо провести расчёт параметров следующих связанных процессов: диффузия водного раствора сульфатов в бетонной оболочке; химические реакции сульфатов с гидратом окиси кальция и гидроалюминатом кальция цементного камня; изменение напряжённо-деформированного состояния бетонной конструкции и вмещающего грунта; фильтрация воды через бетонную оболочку.

Так как скорость диффузии очень мала, протекание диффузионных процессов в бетонной оболочке без качественного изменения её проницаемости, без существенного разрушения и потери функциональных свойств продолжается довольно длительное время в зависимости от качества бетона (15-20 лет и



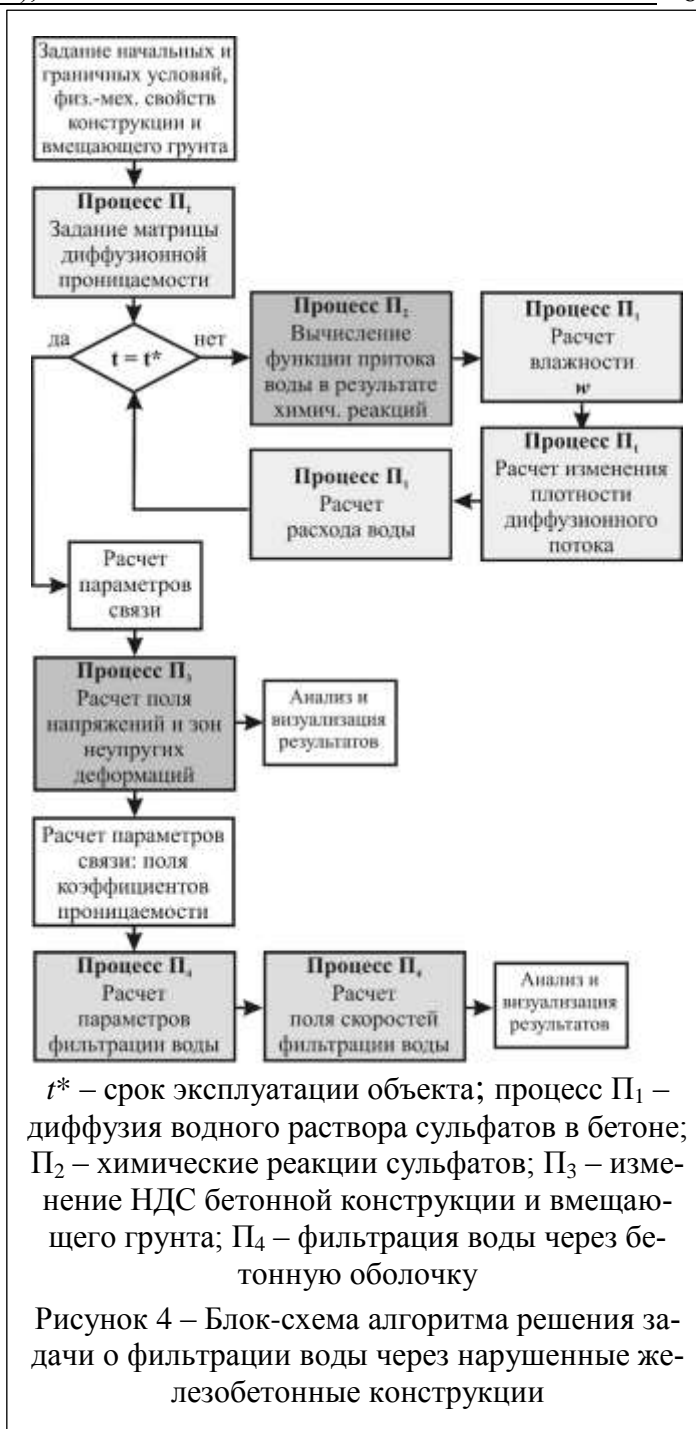
более). Одновременно с диффузией воды в бетоне происходят химические реакции сульфатов с гидратом окиси кальция и гидроалюминатом кальция цементного камня. В течение этого времени изменение НДС оболочки и вмещающего массива незначительно, появление зон неупругих деформаций маловероятно.

Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рис. 4.

В качестве основного процесса, моделируемого во времени, выступает диффузия влаги в бетонной оболочке. В определённые моменты времени эксплуатации водосброса значения влажности бетона определяют условия связи для проведения стационарных расчётов НДС оболочки и вмещающего грунта, их проницаемости (параметр связи) и параметров фильтрации воды. Задача о диффузии воды в бетоне решается с учётом участия воды в химических реакциях.

*Изменение напряжённо-деформированного состояния, фильтрация газа и действие взрыва в газонасыщенном массиве при проходке выработки буровзрывным способом.* Задача о воздействии взрыва зарядов ВВ при проведении одиночной горной выработки в газонасыщенном углепородном массиве является связанной задачей второго класса, состоящей в определении нестационарного напряжённо-деформированного состояния породного массива, распространения волны напряжений от взрыва зарядов и параметров нестационарной фильтрации метана. Изменение напряжённо-деформированного состояния среды влечёт за собой изменение её проницаемости.

Поле значений коэффициентов проницаемости обуславливает изменение параметров фильтрации газа, в том числе и его давление в трещинно-поровом пространстве. В свою очередь, изменение давления газа влияет на напряжённое состояние среды. Кроме этого, во время распространения ударной волны ска-



чок давления на её фронте и зона растяжения за фронтом накладываются определённые возмущения на поле напряжений и поле давления газа. Поэтому для моделирования геомеханических и фильтрационных процессов при взрывании шпуровых зарядов в газонасыщенном массиве горных пород необходимо провести расчёт параметров связанных процессов: изменения во времени НДС массива в забое одиночной горной выработки под действием силы тяжести; изменения поля напряжений при действии волны сжатия от взрывания шпуровых зарядов и отражённой от свободной поверхности волны растяжения; фильтрации газа в нарушенном массиве с учётом действия газообразных продуктов взрывания ВВ.

Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рис. 5.

Процессы изменения НДС ( $\Pi_1$ ), вызывающие трещинообразование, и фильтрация метана ( $\Pi_2$ ), если метаносодержащие породы попадают в нарушенную область – область фильтрации, происходят практически одновременно. В определённый момент времени  $t_{взр}$  происходит взрывание шпуровых зарядов ( $\Pi_3$ ). Поэтому будем считать рассмотренные связанные процессы смешанными, в качестве основных будут выступать параллельные процессы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , в момент времени  $t = t_{взр}$  моделируется процесс  $\Pi_3$ .

Верификация модели фильтрации газа в нарушенной области была выполнена путём сравнения расчётных данных по газовыделению в скважину с аналитическими решениями; по распределению давления газа вокруг скважины и изменению давления в подрабатываемом угольном пропластке – с экспериментальными данными; модели разрушения бетона и фильтрации воды через нарушенную оболочку – путём сравнения расчётных данных по глубине коррозионного разрушения и влажности вмещающего грунта с натурными экспериментальными данными; модели изменения НДС массива – на основе сравнения с данными по смещениям контура выработок в шахтных условиях; модели развязывания и протекания газодинамических явлений – путём сравнения расчётных параметров процесса и шахтных данных; модели нагнетания жидкости в



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма решения задачи расчёта НДС массива при проходке выработки буровзрывным способом

угольный пласт – путём сравнения расчётных скоростей газовыделения из контрольного шпура с фактическими данными при различных режимах нагнетания.

### 3 Исследование степени влияния каждого из связанных процессов геомеханики на изменение массивов общих параметров

Зачастую процессы, происходящие в массиве горных пород при подземной добыче угля, имеют неодинаковое влияние на конечный результат. Например, при расчёте параметров напряжённого состояния можно пренебречь изменением температуры пород на различной глубине, так как в данном случае процесс теплового расширения очень незначительно влияет на распределение значений геомеханических параметров. А при моделировании процесса выброса угля и метана нельзя исключать из системы ни один из связанных процессов изменения НДС, фильтрации и десорбции метана – математическая модель теряет свою результативность.

В каких же случаях при математическом моделировании нужно учитывать все происходящие процессы? Какими из них и когда можно пренебречь для упрощения задачи? Каков критерий оценки степени влияния каждого из происходящих в исследуемой области процессов на общий результат – изменение массивов общих параметров? Для решения этой задачи определим изменение массивов рассчитанных параметров в различные моменты времени при учёте различного числа процессов.

Каждый из связанных процессов при отдельном их рассмотрении будем обозначать  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  и т.д.; общий процесс, включающий все составляющие и их взаимосвязь, –  $\Pi$ . Массивы параметров процесса  $\Pi$  на каждой временной итерации –  $n$ ; процесса  $\Pi - \Pi_1$  (общий процесс без учёта  $\Pi_1$ ) –  $n_1$ . В качестве критерия, характеризующего влияние процесса  $\Pi_1$  на общий результат  $\Pi$ , возьмём функцию, вычисляемую на каждой временной итерации, которая фактически выражает относительную погрешность расчёта при неучёте одного из связанных процессов в общей постановке задачи:

$$\Delta\Pi(\Pi_1) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|n_i - n_{i1}|}{|n_i|}}{N} \cdot 100;$$

где  $N$  – количество элементов в области сравнения.

**Исследование процессов изменения НДС массива  $\Pi_1$  и фильтрации метана  $\Pi_2$ .** Исследуем влияние этих процессов на результат расчёта. Для этого решим три задачи с одинаковыми начальными и граничными условиями: в полной постановке (процесс  $\Pi$ ); расчёт параметров напряжённого состояния без учёта сил, обусловленных давлением газа (определение влияния процесса  $\Pi_2$  на общий результат) и расчёт параметров фильтрации метана без учёта НДС массива (определение влияния процесса  $\Pi_1$  на общий результат) при  $K = \text{const}$ . Затем с помощью предложенного критерия полученные массивы данных сравним попарно в области, в пределах которой происходит изменение параметров. Её



границы в данном случае отстоят от забоя выработки вверх, вниз, вправо и влево на расстояние, равное высоте выработки.

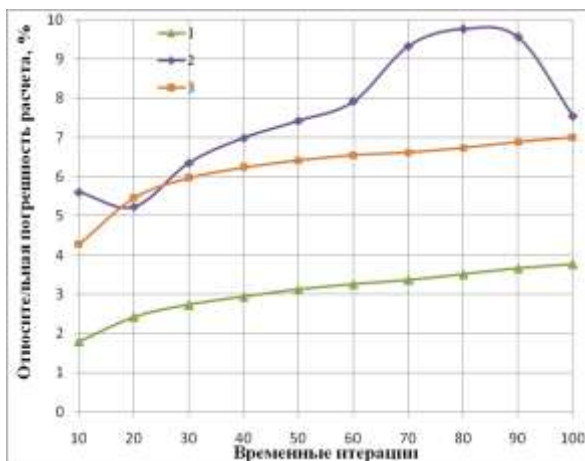
В результате расчётов получим данные сравнения на различных временных итерациях.

Из рис. 6 видно, что влияние учёта давления газа на результат расчёта напряжённого состояния не превышает 10 %. Менее всего пластовое давление метана влияет на изменение максимальной компоненты тензора главных напряжений, которое не превышает 4 % в течение рассмотренных 100 итераций. Наибольшее влияние учёт давления метана оказывает на параметр  $P^*$ , характеризующий степень разгрузки поля напряжений от горного давления.

Учёт напряжённого состояния при расчёте области фильтрации и коэффициентов проницаемости в ней значительно влияет на результат расчёта параметров фильтрации газа, рис. 7 и рис. 8. Сильнее всего изменение НДС массива влияет на погрешность расчёта давления метана, рис. 7, которая достигает 160 %. Это происходит из-за отсутствия границ области фильтрации и равномерного распределения проницаемости по исследуемой области, которые невозможно рассчитать без учёта геомеханики образования области фильтрации.

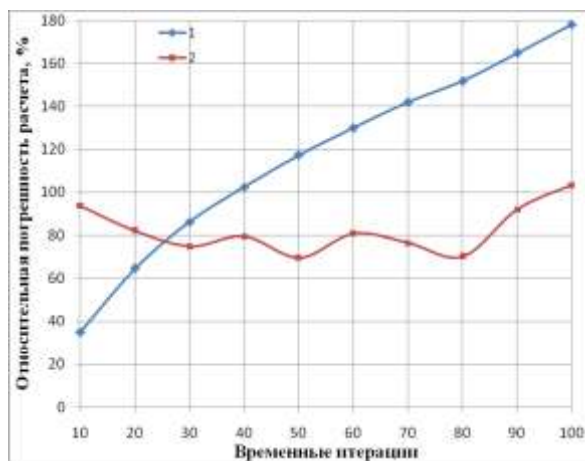
В результате проведённого анализа можно сделать вывод, что отсутствие учёта геомеханики формирования области фильтрации при расчёте фильтрационных параметров приводит к значительной погрешности расчёта, превышающей 100 %.

**Исследование процессов взрывания шпуровых зарядов, из-**



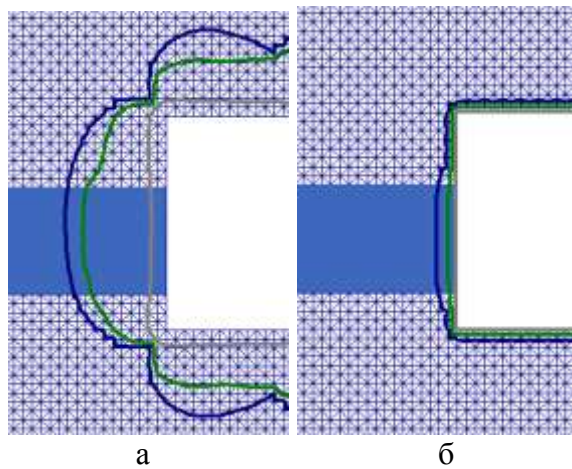
1 – погрешность расчёта параметра  $\sigma_1/\gamma H$ ; 2 – для  $P^*$ ; 3 – для  $Q^*$

Рисунок 6 – Погрешность расчёта при неучёте процесса фильтрации газа



1 – погрешность расчёта для параметра  $p$ ; 2 – для  $V$

Рисунок 7 – Погрешность расчёта при неучёте НДС



а – решение задачи в полной постановке; б – без НДС

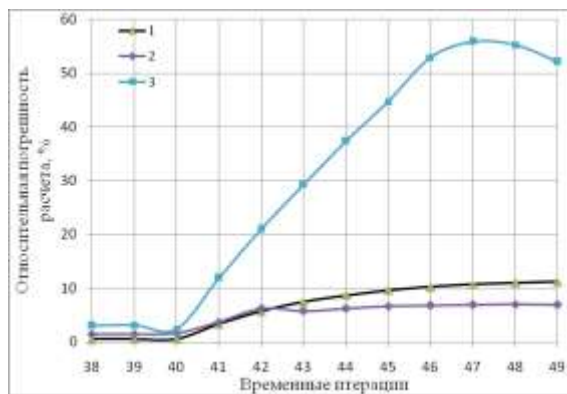
Рисунок 8 – Изобары относительного давления метана, 30 итерация

**менения НДС горного массива и фильтрации газа при проходке выработки буровзрывным способом.**

Рассмотрим задачу об определении нестационарного напряжённо-деформированного состояния породного массива, распространения волны напряжений от взрыва зарядов и параметров нестационарной фильтрации метана. Взрывание шпурового заряда происходит на 40-й временной итерации. Обозначим процесс изменения НДС массива –  $\Pi_1$ ; взрывное воздействие –  $\Pi_2$ ; процесс фильтрации газа –  $\Pi_3$ . Исследуем влияние этих процессов на результат расчёта. Для этого решим четыре задачи: в полной постановке; без учёта сил давления газа; без учёта НДС массива; без учёта взрывного воздействия. Затем полученные массивы данных сравним попарно в значащей области, включающей скважину диаметром 400 мм и шпур для взрывания заряда диаметром 40 мм. В результате расчётов получим данные сравнения на различных временных итерациях.

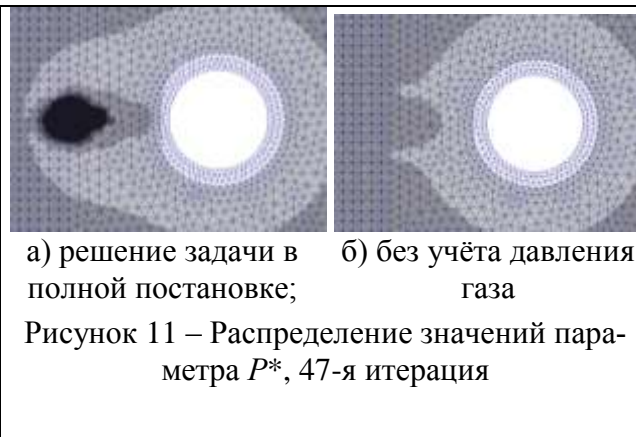
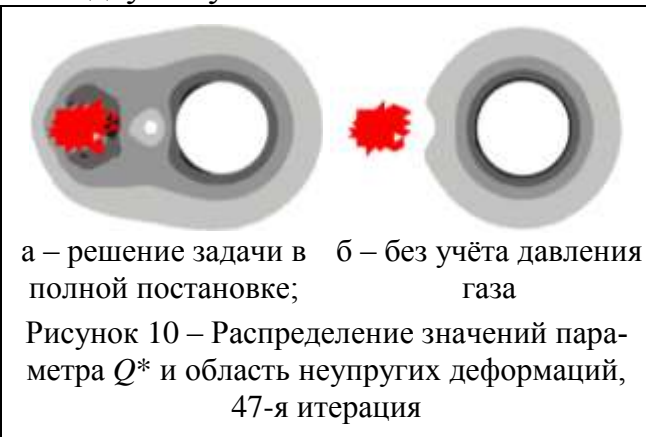
Влияние учёта давления газа на изменение параметров  $\sigma_1/\gamma H$  и  $P^*$ , рис. 9, не превышает 12 % за рассмотренный период времени. Однако отсутствие учёта газового давления в этой задаче приводит к значительным, до 60 %, изменениям параметра  $Q^*$ , характеризующего степень разнокомпонентности поля напряжений.

На рис. 10, рис. 11 хорошо заметна разница между результатами расчёта в этих двух случаях.



1 – погрешность расчёта для параметра  $\sigma_1/\gamma H$ ; 2 – для  $Q^*$ ; 3 – для  $P^*$

Рисунок 9 – Погрешность расчёта при неучёте давления газообразных продуктов детонации



Понятно, что учёт давления образующихся при взрыве газообразных продуктов химических реакций привносит весомую составляющую в общий результат. Таким образом, отсутствие учёта процесса фильтрации при моделировании взрывного воздействия в напряжённых горных породах приводит к значительной погрешности расчёта поля напряжений, достигающей в определённые моменты времени 60 %.

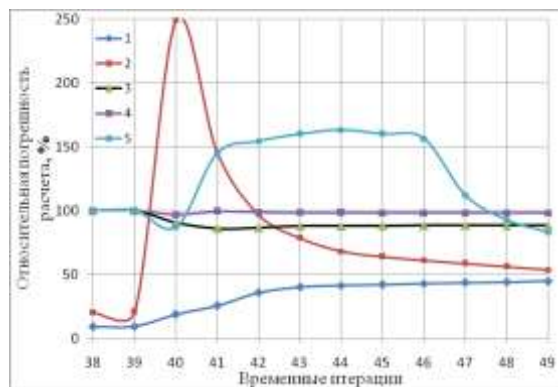
Отсутствие учёта естественного поля напряжений при расчёте области фильтрации и параметров взрывной волны также значительно влияет на результат расчёта, рис. 12.

Сильнее всего изменение НДС массива влияет на погрешность расчёта геомеханических параметров  $\sigma_1/\gamma H$ ,  $Q^*$ , рис. 13,  $P^*$  и скоростей фильтрации газа  $V$ , которая в течение рассмотренных итераций колеблется в пределах от 50 до 250 %.

Погрешность расчёта давления газа в течение рассмотренного периода времени приближается к 50 %, что также говорит о высокой степени зависимости этого параметра от учёта геомеханического фактора. В результате проведённого анализа можно сделать вывод, что процесс изменения НДС массива под действием веса вышележащих пород в этой системе связанных процессов также играет важную роль при получении адекватной картины происходящего. Отсутствие учёта геомеханики образования естественного поля напряжений при расчёте параметров взрывного воздействия приводит к значительной погрешности расчёта, достигающей до 250 %.

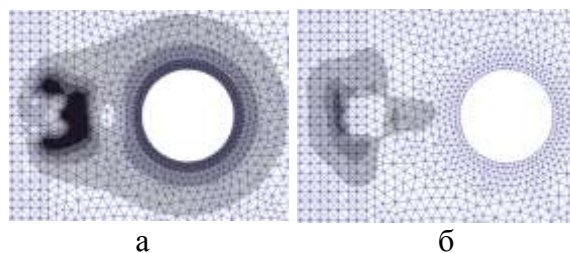
Отсутствие напряжений от взрывной волны даёт погрешности исследуемых параметров до 250 %, рис. 14, причём наиболее заметно изменение параметров скоростей фильтрации газа и разнокомпонентности поля напряжений. Как и следовало ожидать, процесс изменения НДС массива под действием взрыва шпурового заряда в этой системе связанных процессов также играет важную роль. Его отсутствие при расчёте параметров взрывного воздействия приводит к погрешности расчёта, достигающей до 250 %.

Другими словами, в этом случае каждый из трёх связанных процессов играет важную роль в формировании общего результата, при моделировании проведения выработки буровзрывным



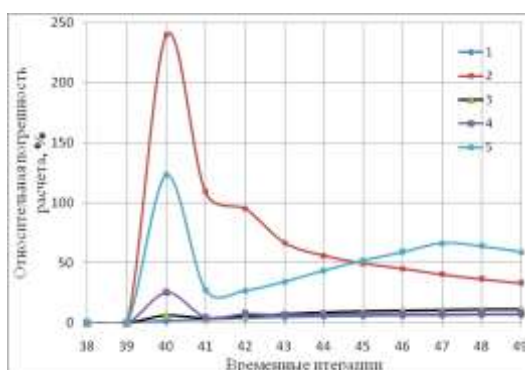
1 – погрешность расчёта для параметра  $p$ ; 2 – для  $V$ ; 3 – для  $\sigma_1/\gamma H$ ; 4 – для  $P^*$ ; 5 – для  $Q^*$

Рисунок 12 – Погрешность расчёта при неучёте поля напряжений



а – решение задачи в полной постановке; б – без учёта НДС

Рисунок 13 – Распределение значений параметра  $Q$ , 42-я итерация



1 – погрешность расчёта для параметра  $p$ ; 2 – для  $V$ ; 3 – для  $\sigma_1/\gamma H$ ; 4 – для  $P^*$ ; 5 – для  $Q^*$

Рисунок 14 – Погрешность расчёта при неучёте напряжений от взрывной волны

способом нельзя пренебрегать ни одним из них.

#### **4 Исследование связанных процессов изменения напряжённо-деформированного состояния массива и фильтрации метана в выработку с анкерной крепью**

В последнее время проделана большая работа по разработке новой технологии анкерного крепления, которая позволяет расширить область применения анкерной крепи в различных горно-геологических и горнотехнических условиях угольных шахт. Анкерная крепь по всем технико-экономическим показателям имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными видами крепления. Конструкции АК разделяются на простую АКпр (все анкера устанавливаются в плоскости сечения), усиленную АКпс (часть анкеров устанавливается с наклоном на забой выработки) и мощную АКпт (часть анкеров устанавливается с наклоном на забой, часть – с наклоном назад, на устье выработки) [8]. Применение конструкций АК позволяет свести смещения пород внутрь выработки к минимальным значениям, сохранить вмещающие породы в первоначальном, монолитном состоянии, а, значит, и предотвратить развитие трещинообразования в зоне влияния выработки. Это говорит о том, что проницаемость вмещающих пород в этой зоне также будет сохранена на природном уровне, что должно значительно ограничить интенсивность фильтрационного движения метана в газоносных породах и выход его в атмосферу выработки.

Опыт ведения горных работ в газонасыщенном углепородном массиве показывает, что технология этих работ может влиять на протекание фильтрационных процессов в нарушенной зоне горного массива. Способы проходки выработки, величина заходки, скорость подвигания забоя активно влияют на динамику перераспределения напряжений впереди движущегося забоя непосредственно в процессе ведения горных работ, на конфигурацию области фильтрации, проницаемость внутри неё и, следовательно, на формирование и направление движения потоков метана в нарушенной области. Таким образом, технологические мероприятия, оказывающие существенное влияние на газовыделение в горные выработки, можно рассматривать как вторую линию защиты, которая должна применяться в условиях газонасыщенности вмещающих пород, независимо от применяемых способов их дегазации. Анкерная крепь как средство влияния на протекание фильтрационных процессов вокруг выработки ранее не рассматривалась.

Исследуем на объёмной математической модели связанных процессов изменения НДС слоистого газонасыщенного массива, вмещающего выработку, и фильтрации метана, как влияет применение АК на газовыделение в выработку.

Математическая постановка задачи:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + X_i = 0; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + q(t) = 0. \end{cases}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} u_x|_{\Omega_1} &= 0; \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0; \\ u_z|_{\Omega_3} &= 0; \\ p|_{\Omega_4} &= p_0; \\ p|_{\Omega_5} &= 0,1 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где  $\Omega_1$  – плоскости внешнего контура  $x = \text{const}$ ;  $\Omega_2$  – горизонтальные границы внешнего контура;  $\Omega_3$  – плоскости внешнего контура  $z = \text{const}$ ;  $\Omega_4$  – граница области фильтрации;  $\Omega_5$  – внутренний контур (выработка).

Условия связи между рассматриваемыми процессами описываются соотношениями (11).

Для сравнения рассмотрим два случая: выработка закреплена подпорной и анкерной крепью с применением конструкции АКпр, рис. 15.

Рассмотрим задачу с условиями, типичными для шахт Донбасса, когда выработка проводится по угольному пласту мощностью 1,8 м, в её кровле расположен газоносный песчаник. Природная метаноносность пласта – (20–25) м<sup>3</sup>/т. Непосредственная кровля представлена аргиллитом мощностью 2,8 м, почва – алевролитом, песчаник основной кровли газоносен (0,7 м<sup>3</sup>/т).

Физико-механические свойства угольного пласта и вмещающих выработку горных пород, используемые при расчётах, приведены в табл. 1.

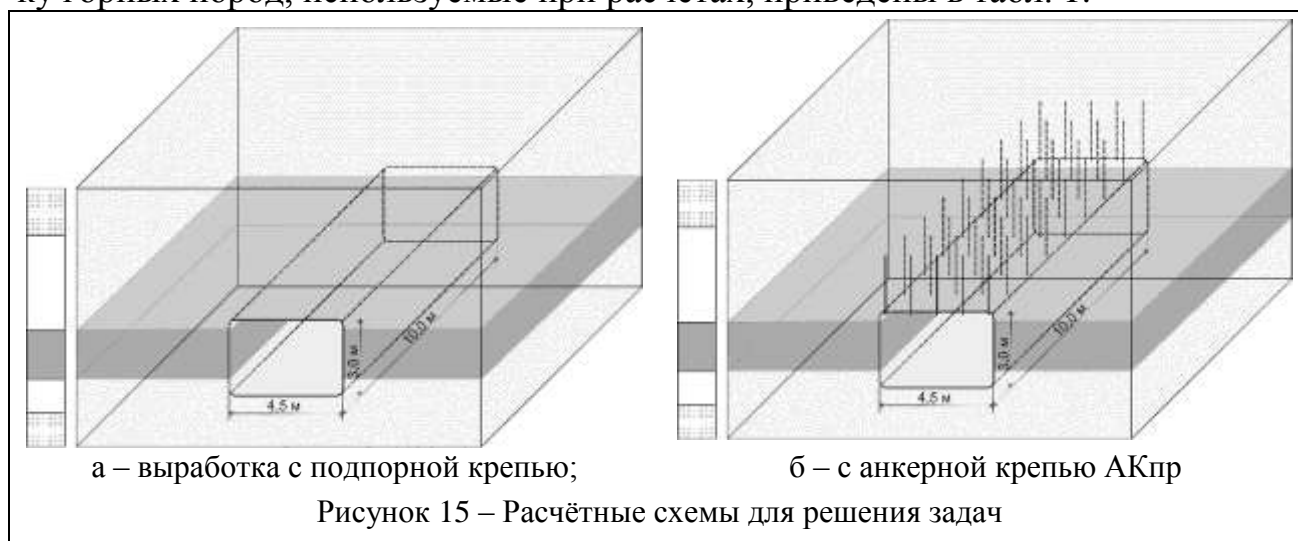
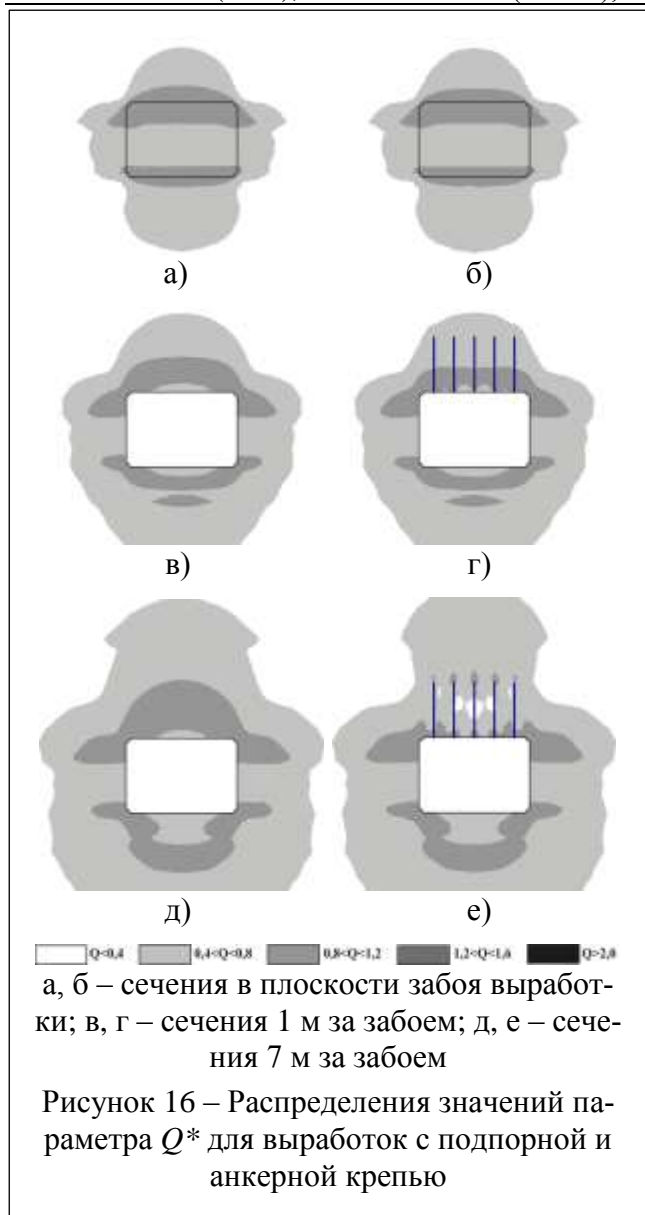


Таблица 1 – Физико-механические свойства вмещающих пород

Порода	Модуль упругости, $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Сцепление, $C$ , МПа	Угол внутреннего трения, $\varphi$ , °	Прочность на растяжение, $\sigma_p$ , МПа
Песчаник	$3 \cdot 10^4$	0,30	7,00	40	5
Аргиллит	$10^4$	0,32	3,50	35	2
Алевролит	$1,5 \cdot 10^4$	0,25	3,50	30	2
Уголь	$5 \cdot 10^3$	0,30	1,75	30	1



**Анализ изменения геомеханических параметров в окрестности выработки с подпорной и анкерной крепью.** В результате решения задачи получаем распределение напряжений в каждой точке исследуемой области. На рис. 16 показаны распределения значений параметра  $Q^*$ , характеризующего разнокомпонентность поля напряжений. Из рис. 16,а,в,д видно, как с отходом забоя выработки в приконтурных породах увеличивается разнокомпонентность поля напряжений. Видно, что слоистость массива (наличие в кровле выработки более прочного песчаника, а также угольного пласта) накладывает отпечаток на распределение геомеханических параметров.

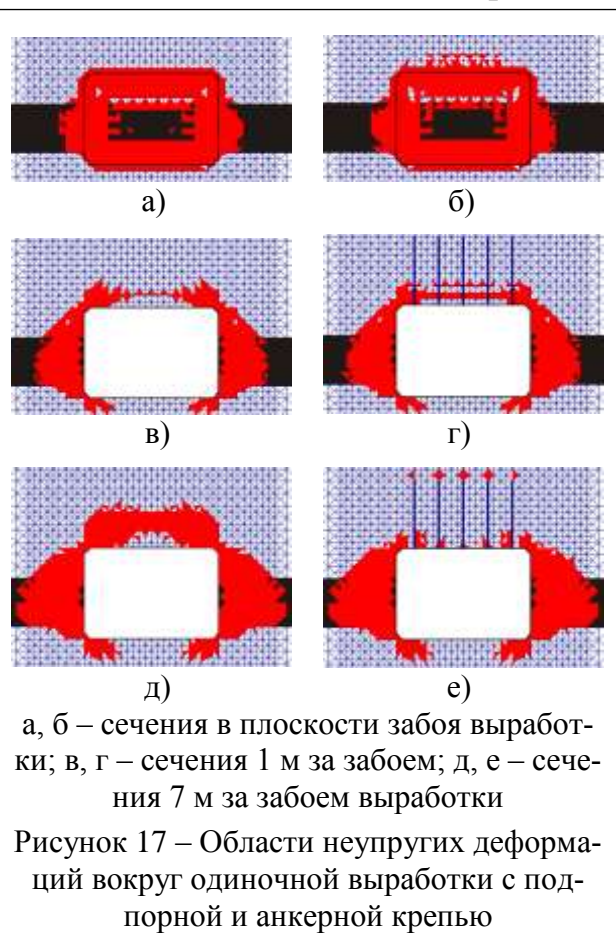
Там, где параметр  $Q^* > 0,7$ , начинается процесс трещинообразования, и, следовательно, проникае-

мость пород будет увеличиваться.

На рис. 16,б,г,е происходит такой же процесс, но при этом в кровле выработки образуется породно-анкерное перекрытие, в котором параметр  $Q^*$  принимает значения, более низкие, чем в случае с подпорной крепью, и изменяется в пределах  $[0,0; 0,4]$ .

Области неупругих деформаций в различных поперечных сечениях области представлены на рис. 17.

С отходом забоя выработки область неупругих деформаций значительно увеличивается. В этих зонах проницаемость массива будет макси-



мальной. На рис. 17,б,г,е область неупругих деформаций в кровле выработки практически исчезает. Это подтверждает предположение, что с установкой анкеров процесс трещинообразования в кровле выработки не развивается.

**Анализ изменения фильтрационных параметров в окрестности выработки с подпорной и анкерной крепью.** Используя результаты расчётов напряжённо-деформированного состояния горных пород вокруг выработки, рассчитаем поля коэффициентов проницаемости и давления метана в выработках с подпорной и анкерной крепью АКпр. На рис. 18 показаны распределения полей коэффициентов проницаемости пород, вмещающих выработки с подпорной и с анкерной крепью.

Как видно из рис. 18,а,б, в случае подпорного крепления область фильтрации с коэффициентами проницаемости, отличными от нуля, образует единую, связную область, в которую попадает угольный пласт и часть расположенного в кровле газоносного песчаника. Внутри этой области метан может свободно перемещаться по направлению от источников газовой выделения – угольного пласта и песчаника – в атмосферу выработки, давление газа в которой (0,1 МПа) намного ниже давления метана в ненарушенном массиве (до 8-12 МПа).

На рис. 18,в,г видно, как изменяются контуры области фильтрации, если в кровле выработки установлены анкера. В этом случае область фильтрации разорвана на две, не связанные друг с другом зоны, между которыми находится породная непроницаемая для газа перемычка. Аргиллит, из которого она образована, благодаря системе анкеров сохранён в природном монолитном состоянии. Фильтрация метана через такую перемычку невозможна, рис. 19.

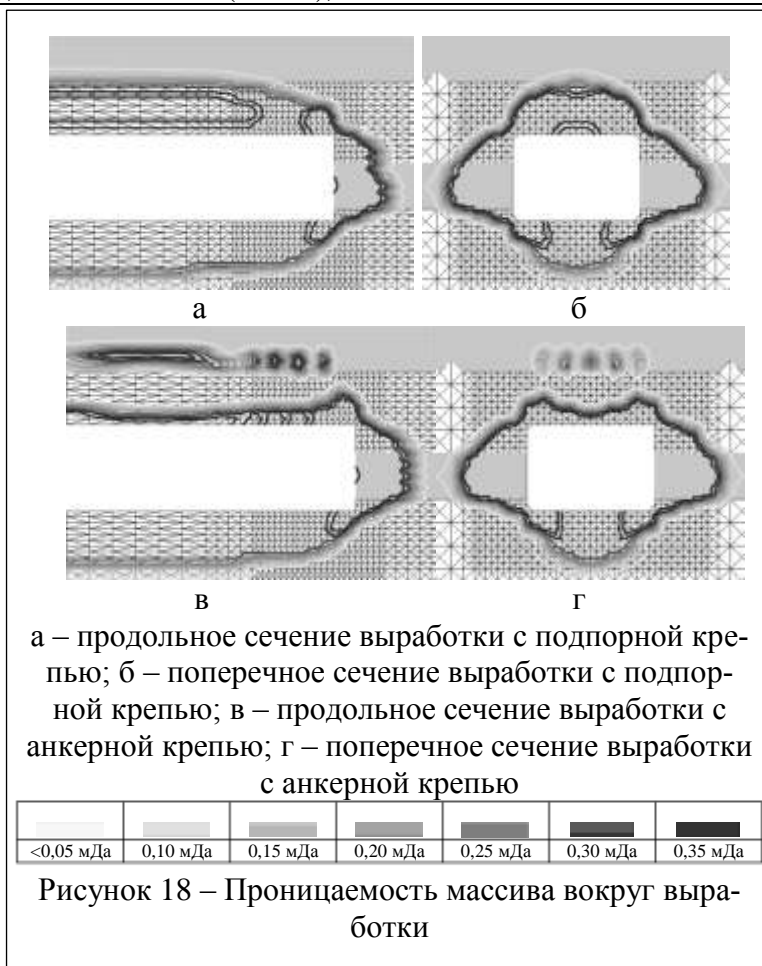


Рисунок 19 – Состояние кровли выработки с анкерной крепью

О высокой степени монолитности можно судить по хорошо сохранившимся следам исполнительного органа комбайна на поверхности аргиллита. Это говорит о том, что метан из газонасыщенного песчаника, расположенного в кровле, не сможет попасть в атмосферу выработки.

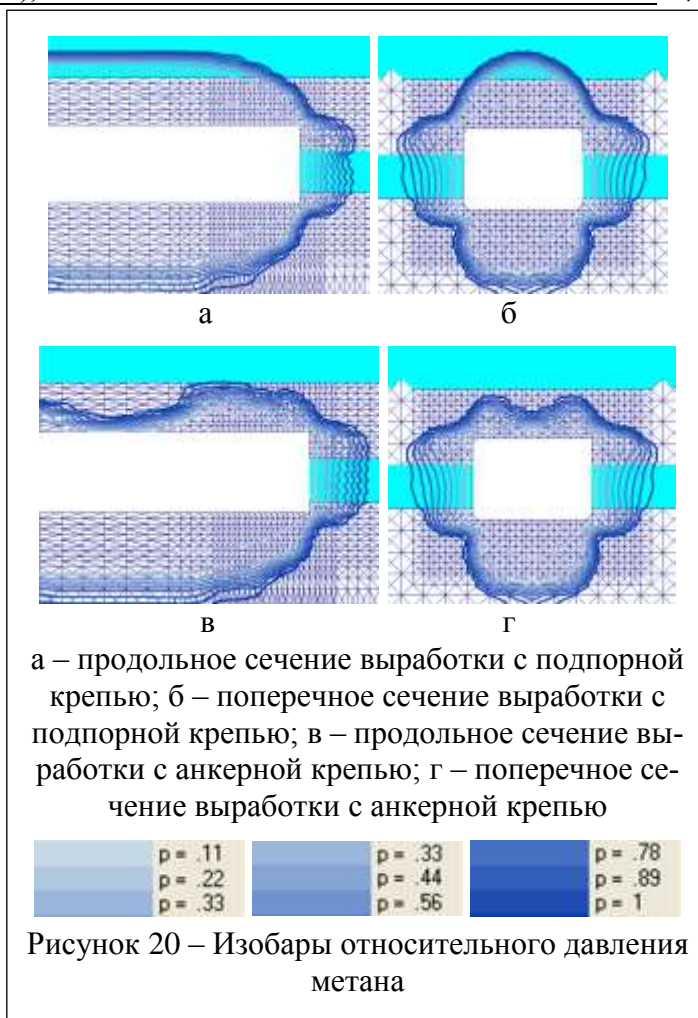
На рис. 20 показаны изображения относительного давления метана  $p = P/P_0$  ( $P_0$  – давление метана в нетронутом массиве) во вмещающих породах выработки с подпорным креплением и выработки с анкерной крепью.

Давление метана в газонасыщенном песчанике кровли выработки с подпорной крепью, так же, как и в прилегающих к выработке частях угольного пласта, падает, рис. 20,а,б. Это говорит о том, что метан перемещается из областей с более высоким давлением в область, где давление минимально – то есть в атмосферу выработки. Вокруг выработки с подпорной крепью активно происходит процесс фильтрации метана.

На рис. 20,в,г показано, что в результате образования непроницаемой породно-анкерной переемычки область пониженного давления не затрагивает газонасыщенный песчаник кровли. То есть метан из этого источника газовой выделению в выработку с анкерной крепью не попадает, что значительно уменьшит её газообильность.

На шахте Суходольская-Восточная две выработки с рамным и анкерным креплением проводились в одинаковых горно-геологических условиях. Групповой вентиляционный ходок блока №1 проводился по угольному пласту мощностью 1,8 м с природной газонасыщенностью  $22,5 \text{ м}^3/\text{т}$ , в кровле выработки – песчаник мощностью (20-30) м, природной газонасыщенностью –  $1,5 \text{ м}^3/\text{т}$ ; крепление – анкерное АКпт. 12-й восточный конвейерный штрек проводился с использованием рамного крепления. Источниками метановыделения в данных условиях являются угольный пласт и песчаник кровли выработки. По данным ВТБ газообильность группового вентиляционного ходка в течение времени возведения и до подхода лавы была значительно меньшей, чем 12-го восточного конвейерного штрека.

Аналогично на шахте Самсоновская-Западная в одинаковых горно-геологических условиях проведены выработки с анкерным и рамным креплением.





ем. Природная газоносность угольного пласта  $k_2^H$  и пропластка  $k_2^6$  – 20-25 м<sup>3</sup>/т; песчаника – 5 м<sup>3</sup>/т. Вентиляционный ходок 8-й восточной уклонной лавы закреплён конструкциями АКпт. 8-й восточный конвейерный уклон крепился рамной крепью. Источниками метановыделения в данных условиях являются угольный пласт, в кровле выработки – пропласток  $k_2^6$  и песчаник. По данным ВТБ газообильность вентиляционного ходка значительно меньше, чем 8-го восточного конвейерного уклона.

**Влияние количества анкеров в породно-анкерном перекрытии и элементов конструкции анкерной крепи на газовыделение в выработку.** После проведения расчётов, выполненных методом конечных элементов, были получены распределения параметров  $Q^*$  и  $P^*$ , значений коэффициентов проницаемости и относительного давления метана  $p/p_0$  для случаев, когда выработка не закреплена; в кровле выработки – 1 анкер; 3 анкера; 5 анкеров.

Было показано, что применение анкеров снижает разнокомпонентность поля напряжений, установка каждого дополнительного анкера увеличивает площадь области ненарушенных пород и области упругих деформаций, в которых  $Q^* < 0,8$ , и сокращает размеры зон, в которых породы кровли выработки разгружены от горного давления, а параметр  $P^* > 0,1$ . Тем самым не допускается развитие процесса трещинообразования в приконтурных породах, сохраняется их естественная монолитность. В этом случае давление метана в кровле выработки падает, коэффициент проницаемости породы уменьшается, скорость фильтрации в кровле также значительно понижается. Это происходит за счёт образования в кровле выработки опорного перекрытия, напряжённое состояние которого близко к нетронутому массиву.

Проанализируем изменение таких показателей газовой ситуации в выработке, как средняя скорость фильтрации и расход метана с единицы длины выработки в зависимости от количества установленных в кровле анкеров. Для этого рассчитаем средние значения указанных параметров в области фильтрации вокруг выработки для схем АК с различным количеством анкеров в сечении. Полученные зависимости представлены на рис. 21.

Плотность установки анкеров рассчитывается по формуле:  $\delta = N_a/L$ , где  $N_a$  – количество анкеров в сечении;  $L$  – длина участка сечения, на котором установлены анкера, м.

Из графика на рис. 21 видно, что по всем рассчитанным показателям газовая ситуация в выработке улучшается при увеличении количества анкеров, но дальнейший рост (при  $\delta > 1$ ) их числа не приводит к сколько-нибудь значительному её изменению.

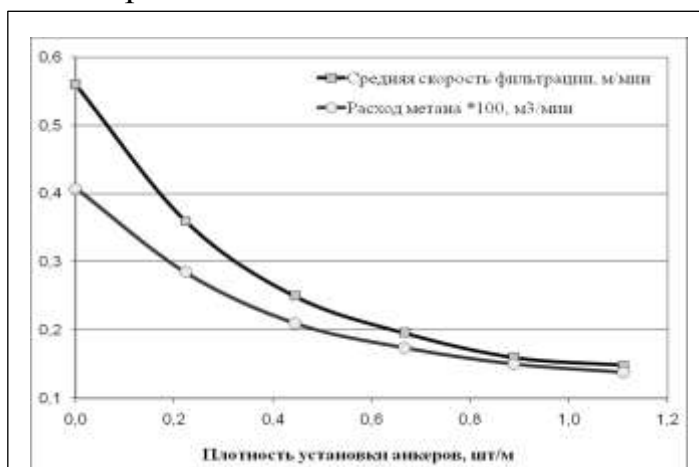


Рисунок 21 – Изменение параметров фильтрации в зависимости от плотности установки анкеров

Таким образом, при протекании связанных процессов фильтрации метана и изменения НДС массива вокруг выработки с анкерной крепью в её кровле формируется непроницаемая породно-анкерная переемычка, которая разделяет область фильтрации на две не связанные между собой зоны и препятствует фильтрации метана из источников газовыделения, расположенных в кровле; причём с увеличением плотности установки анкеров до значения 1,1 анк/м средняя скорость фильтрации и расход метана снижаются на 75 %.

Аналогичные исследования были проведены для случаев, когда источниками метановыделения в выработку являются также угольный пласт и газоносные породы почвы. В этом случае применяемые конструкции анкерной крепи должны содержать такие элементы, как опоры перекрытия выработки, состоящие из боковых анкеров, и основание конструкции, состоящее из почвенных анкеров. Анкера опорной части конструкции АК могут устанавливаться по простой, усиленной и мощной схемам. Количество анкеров в опорах конструкции и вид схемы зависят от высоты выработки, мощности угольного пласта и прочности угольного пласта и вмещающих пород.

Расчётами показано, что каждый установленный боковой анкер уменьшает площадь зоны неупругих деформаций в боках выработки. Область повышенной разнокомпонентности в этой зоне также сокращается. Значение параметра  $P^*$  в приконтурной области повышается, становится близким к значению 0,2. Такие данные говорят о сохранении боков выработки в устойчивом состоянии, об остановке процессов трещинообразования и выдавливания угля, что приводит к снижению фильтрационной проницаемости этой части приконтурных пород.

На рис. 22 приведены графики вертикального распределения средних значений коэффициентов

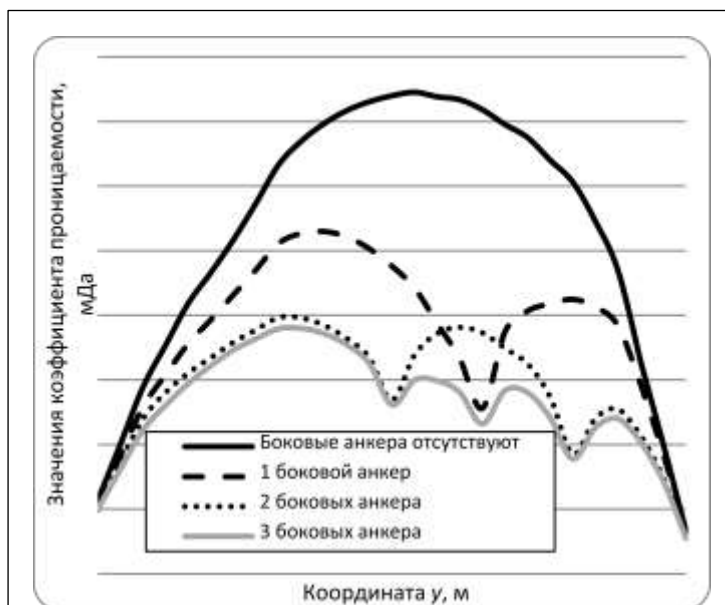


Рисунок 22 – Вертикальное распределение средних значений коэффициентов проницаемости в заанкерванной области боков выработки

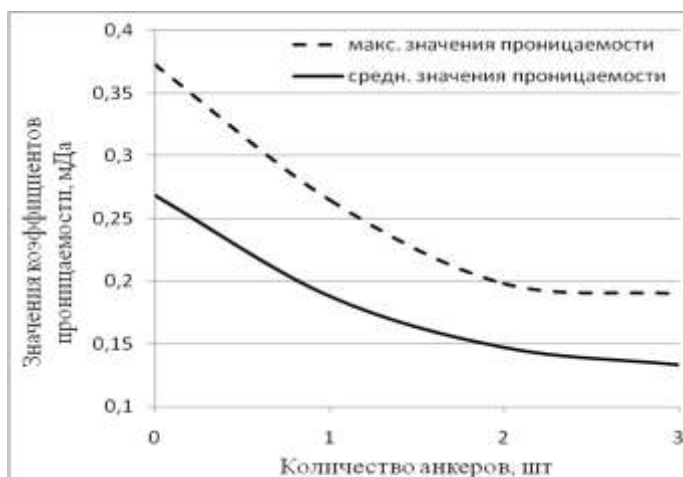


Рисунок 23 – Изменение значений коэффициентов проницаемости в боках выработки в зависимости от количества боковых и почвенных анкеров

фициентов проницаемости в заанкерванной области боков выработки.

Видно, что каждый из анкеров, установленных в боку выработки, уменьшает значение коэффициентов проницаемости в заанкерванной области на (20-30) %, что приводит к значительному снижению объёма метана, выделенного из угольного пласта во время проведения и эксплуатации выработки.

На рис. 23 приведены зависимости изменения средних и максимальных значений проницаемости пород в боках выработки от количества боковых и почвенных анкеров  $n$ ,  $n \in [0; 3]$ .

При моделировании связанных процессов изменения НДС массива с АК, включающей боковые и почвенные анкера, и фильтрации метана установлено, что зона повышенной разнокомпонентности в нижней части боков выработки значительно сократилась. Это говорит о снижении уровня разгрузки вмещающих пород от горного давления. Зона неупругих деформаций в почве выработки также уменьшилась, что приводит к снижению величины пучения почвы и её фильтрационной проницаемости.

На рис. 24 показаны графики горизонтального распределения средних значений коэффициентов проницаемости в почве выработки. Из рисунка видно, что применение боковых анкеров снижает значение фильтрационной проницаемости в почве выработки. Это приводит к значительному снижению объёма метана, выделенного во время проведения и эксплуатации выработки из источников, расположенных в почве выработки.

На рис. 25 приведены зависимости изменения средних и максимальных значений проницаемости почвы выработки от количества боковых и почвенных анкеров  $n$ ,  $n \in [0; 4]$ .

Применение анкерного крепления боков выработки, проводимой по газоносному угольному пласту, сдерживает процес-

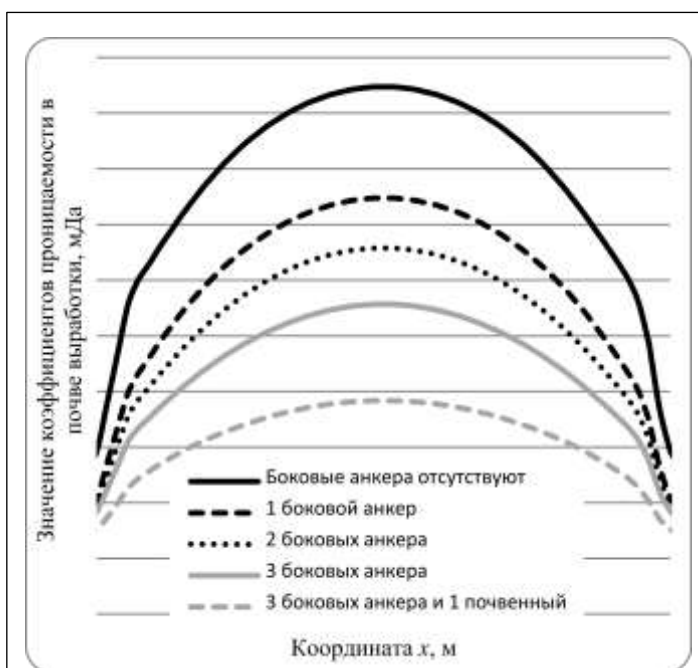


Рисунок 24 – Горизонтальное распределение средних значений коэффициентов проницаемости в почве выработки

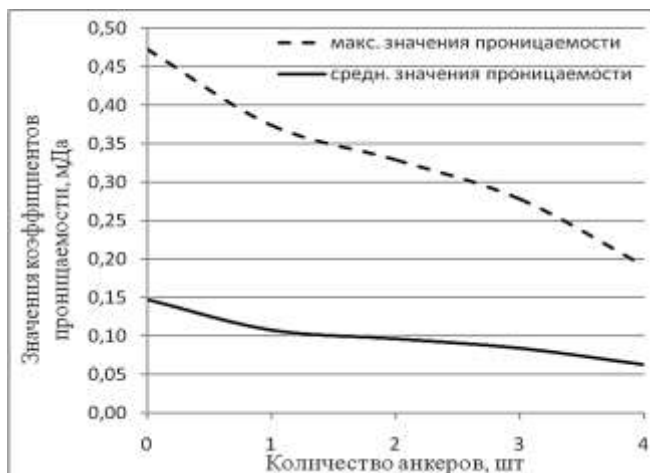


Рисунок 25 – Изменение значений коэффициентов проницаемости в почве выработки в зависимости от количества анкеров

сы трещинообразования и выдавливания угля – каждый из анкеров, установленных в боку выработки, уменьшает значение коэффициентов проницаемости, как параметров связи между геомеханическими и фильтрационными процессами, в заанкерванной области на 20-30 %; применение почвенных анкеров значительно сокращает зону повышенной разнокомпонентности в нижней части боков выработки, уменьшает зону неупругих деформаций в почве выработки, что приводит к снижению величины пучения почвы и её фильтрационной проницаемости при установке трёх боковых анкеров – на 40 %, трёх боковых и одного почвенного – на 60 %.

Таким образом, впервые показано значение анкерной крепи как технологического способа снижения метанообильности горных выработок в случаях, когда источники выделения метана находятся в боках и в почве выработки. Впервые получены закономерности изменения фильтрационной проницаемости в зависимости от количества установленных боковых и почвенных анкеров.

### **5 Исследование связанных процессов изменения НДС массива и фильтрации газа при протекании газодинамических процессов в угольном пласте в забое выработки**

**Особенности математического моделирования газодинамических процессов в зоне влияния тектонических нарушений.** В тектоническом отношении Донбасс характеризуется развитием разнообразных форм геологических структур как пликативных, так и разрывных [9]. В крупных синклинальных складках сосредоточено большинство шахт Донбасса. Осложняют условия эксплуатации месторождений размывы и замещения угольных пластов.

Анализ геологических условий внезапных выбросов угля и газа в Центральном и других районах Донбасса показал, что большинство выбросов произошло в тектонически нарушенных зонах пликативного характера (пережимы, изгибы пластов по падению и простиранию флексуры) и мелких надвигах [10]. Наибольший изгиб пластов характеризуется повышенной нарушенностью, и основное количество выбросов приурочено именно к этим участкам. В результате внутрислоевых движений угольные пласты становятся рыхлыми, бесструктурными, иногда приобретают многопачечное строение. При прохождении этих участков горными выработками отмечаются повышенные (в 1,5-2 раза) выделения метана в выработки.

В окрестности тектонических нарушений уголь перемят, на (10-20) м по обе стороны от нарушения имеет начальную проницаемость. В результате проведения горной выработки перераспределяется поле начальных напряжений, во вмещающем массиве формируются системы трещин. На поле начальной, тектонической, проницаемости  $K_{\text{тект}}$  накладывается поле технологической проницаемости  $K_{\text{техн}}$ , которая определённым образом зависит от компонент тензора главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ :

$$K = K_{\text{тект}}(x, y) + K_{\text{техн}}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3).$$

Полная система уравнений, описывающая нестационарное поведение двухфазной среды «трещиновато-пористое твёрдое тело – газ» в тектонически нарушенной зоне, выглядит следующим образом:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = \rho_s \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right); \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t);$$

$$k = k_{\text{мехн}} + k_{\text{тект}},$$

где  $k_{\text{мехн}}$  определяется из соотношений (11).

Начальные условия для поставленной задачи:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H;$$

$$\sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H;$$

$$p|_{t=0} = p_0.$$

Граничные условия:

$$p|_{\Omega_1(t)} = p_0; \quad u_x|_{\Omega_3} = 0;$$

$$p|_{\Omega_2} = 0,1 \text{ МПа}; \quad u_y|_{\Omega_4} = 0,$$

$$k_{\text{тект}} = f(x, y);$$

где  $\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $\Omega_3$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Условиями образования полости выброса будем считать:

1) принадлежность конечного элемента области неупругих деформаций, вызванных растягивающими напряжениями;

2) выполнение критерия превышения градиентом фильтрации метана критического значения  $\text{grad } p > C_1$ .

В местах геологических (тектонических) нарушений породы ослаблены, перемяты в результате тектонических смещений отдельных участков, вследствие чего формируются определённые их свойства. Тектоника угольных пластов является первопричиной возникновения особых физико-механических свойств угольного вещества. Тектонические процессы создали в угольных пластах участки с повышенной микронарушенностью (препарацией), где угольное вещество в силу ряда физических свойств (пониженная прочность, малая газопроницаемость, повышенная газоотдача и др.) обладает склонностью к внезапным выбросам при вскрытии этих участков горной выработкой. Поэтому в нарушенной зоне вблизи тектонического нарушения будем задавать прочность угля на растяжение близкой к 0.

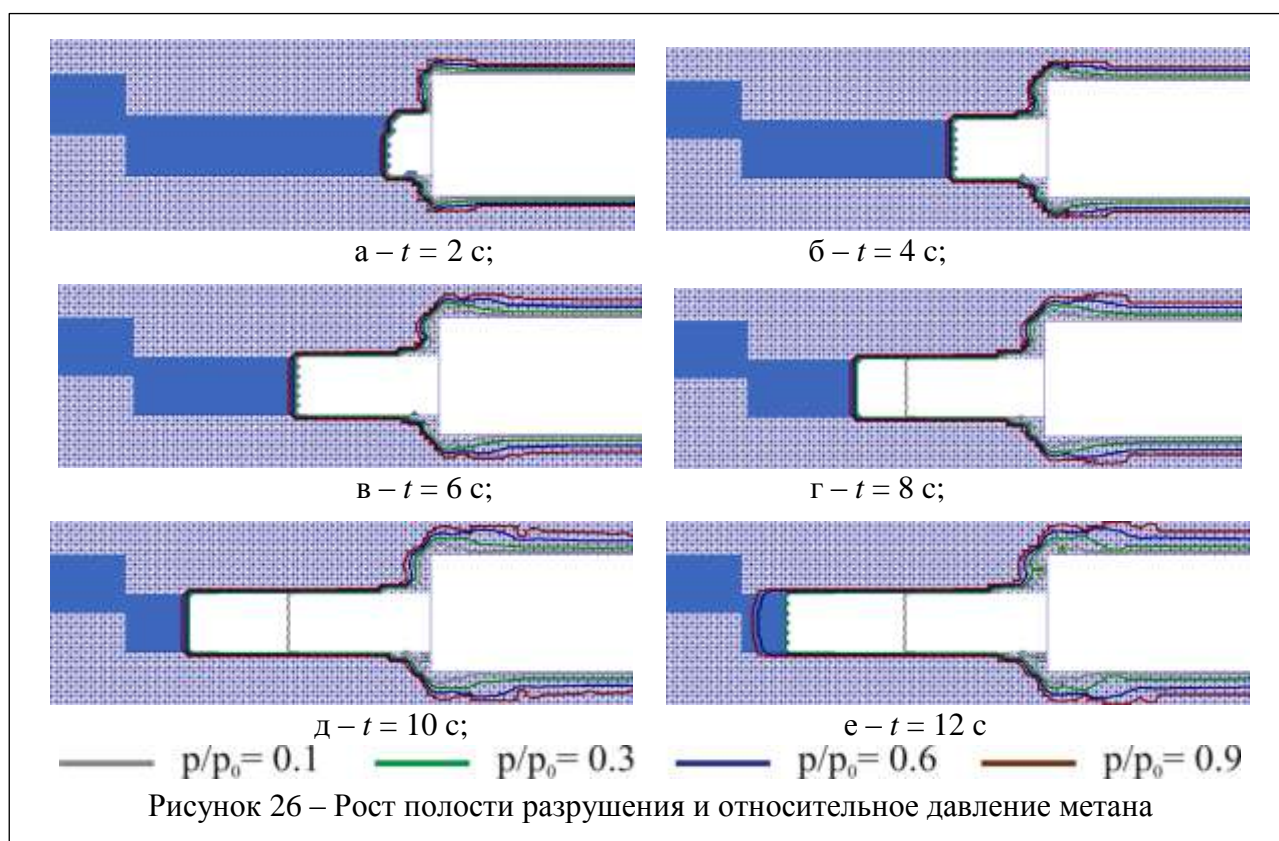
**Моделирование протекания газодинамических процессов при комбайновом способе проведения выработки.** Проведём серию вычислительных

экспериментов, которые позволили бы проследить изменение фильтрационных параметров на движущемся фронте выброса в течение времени его протекания. Рассмотрим процесс течения газа в трещиновато-пористой среде, которая деформируется под действием сил горного давления во время проведения одиночной горной выработки.

Рассмотрим случай, когда забой выработки высотой 3 м находится на расстоянии 7,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м, вокруг которого находится десятиметровая зона перемятого угля. Мощность угольного пласта 1,5 м, глубина проведения выработки – 1200 м. Газоносность угля –  $20 \text{ м}^3/\text{т}$ . Вмещающая порода – аргиллит. Шаг по времени составляет 0,1 с. При выполнении расчёта получим распределение геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени.

На рис. 26 показаны изобары относительного давления метана вокруг выработки и рост полости выброса во время протекания динамического процесса. Время протекания процесса – 11 с. На первых секундах происходит инициация выброса; в интервале (2-10) с – собственно процесс выброса, на (10-11) с – его затухание.

В течение этого времени давление метана в угольном пласте вблизи выработки быстро падает, градиенты давления и скорость течения метана принимают очень высокие значения, проницаемость угля стремительно растёт – происходит вынос угля и образование полости в угольном пласте (рис. 26,а-д), длина которой достигает 6,5 м при данных условиях. Затем рост полости останавливается (рис. 26,е), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы



и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

Рассмотрим, как изменяется проницаемость угля, рис. 27, давление, рис. 28, расход, рис. 29, и скорость течения метана, рис. 30, на фронте выброса во время протекания всего процесса. По кривым проницаемости, рис. 27, б, отчётливо прослеживается деление процесса на стадии инициирования (самая тёмная кривая,  $t = 0,2$  с), протекания (кривые  $t = 2-10$  с) выброса и его затухания (светлые кривые  $t > 10$  с). Также видно, что значительное – в 5-9 раз – увеличение фоновой проницаемости происходит на расстоянии (0,1-0,3) м от свободной поверхности фронта выброса.

Эти расчётные данные подтверждаются экспериментальными наблюдениями [11]. Автор статьи пишет, что «в период протекания выброса у поверхности обнажения существует и перемещается вместе с ней зона предельного состояния (зона разрушения). В пределах этой зоны система образующихся трещин нормально ориентирована к направлению развития выброса. По данным экспериментальных наблюдений глубина её составляет (0,3-0,5) м».

Давление метана, рис. 28, в течение основного времени протекания процесса ( $t = 2-10$  с) резко падает с 8 МПа в глубине массива до (0,1-2) МПа на свободной поверхности полости выброса. Причём такое резкое падение давления происходит на расстоянии всего лишь 0,15 м. Это говорит об огромной величине градиентов давления метана на этом промежутке, которые обуславливают развитие скоростей течения метана, достаточных для разрыва расслоившегося угля на мелкие пластинки и выноса их на большие расстояния вглубь выработки. На стадии затухания кривые давления метана при  $t = 12; 14$  и 16 с заметно выполаживаются, величина градиентов давления метана уменьшается на порядок.

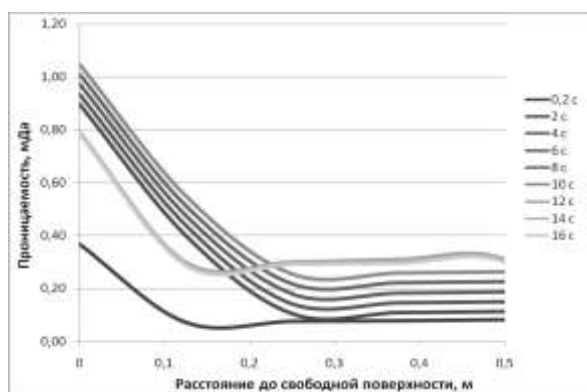


Рисунок 27 – Характер изменения проницаемости угля на фронте разрушения в различные моменты времени

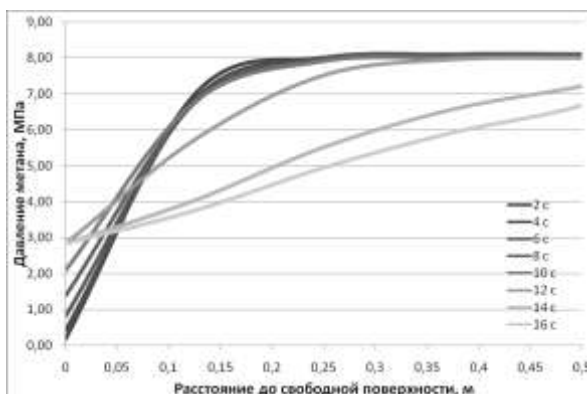


Рисунок 28 – Распределение давления метана в различные моменты времени

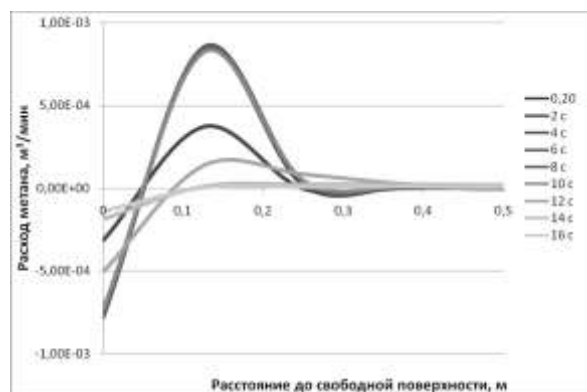


Рисунок 29 – Расход метана по центральной оси выработки в различные моменты времени

Если сравнить глубину зоны изменения параметров «проницаемость угля» (рис. 27) и «давление метана» (рис. 28), то видно, что в первом случае она равна 0,26 м, во втором – 0,17 м. Это говорит о том, что в процессе выброса угля и газа волна разрушения опережает волну падения давления на 0,09 м.

Можно заметить, рис. 28, что давление метано-воздушной смеси внутри полости выброса в течение процесса выброса увеличивается с 0,1 до 3 МПа. Это происходит из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля, временного повышения давления воздуха в самой выработке. Изменение граничных условий – повышение давления метана на контуре полости выброса – является одним из условий затухания процесса выброса угля и газа [12].

На рис. 29 показаны кривые расходов метана по центральной оси выработки в различные моменты времени. Причём положительные значения расходов означают приток метана за счёт его десорбции, отрицательные – выход метана в атмосферу выработки. Как видно из рисунка, основной приток метана в трещинное пространство угля, максимальная интенсификация десорбционных процессов происходит на стадии протекания процесса выброса ( $t = 2-10$  с) на расстоянии (0,05-0,25) м от свободной поверхности. В атмосферу выработки максимальное количество метана выделяется в этот же период времени.

На рис. 30 показано изменение скоростей течения метана в различные моменты времени. Видно, что при инициировании выброса ( $t < 2$  с) происходит рост скоростей фильтрации, угол наклона кривых увеличивается и достигает максимума на протяжении основной стадии процесса (кривые  $t = 2-10$  с), на расстоянии 0,1-0,25 м от поверхности полости выброса.

На этапе затухания максимальная скорость течения метана на фронте выброса уменьшается в 6-7 раз.

**Моделирование протекания газодинамических процессов при буровзрывном способе проведения выработки.** Взрывные работы (технологические и особенно сотрясательное взрывание) зачастую являются причиной выбросов угля и газа [13]. Статистика выбросов, произошедших в результате ведения взрывных работ, в различных угледобывающих странах мира представлена в табл. 2.

Рассмотрим такие же горно-геологические условия проведения выработки, как в предыдущем случае, но буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания. Радиус заряда –  $R_0 = 0,025$  м. Конечноэлементная сетка, шпур для отбойки угля и породы показаны на рис. 31. Шаг по времени составляет 0,1 с. Взрывание происходит в момент времени  $t = 0,2$  с.

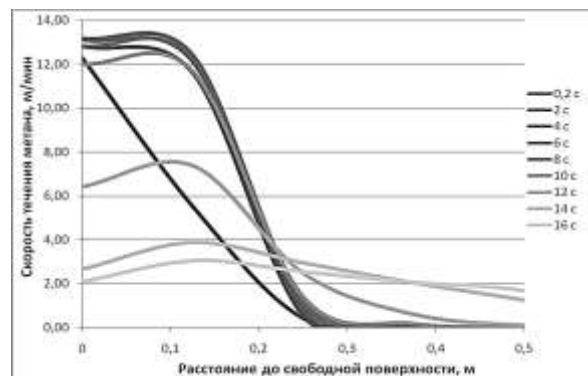


Рисунок 30 – Изменение скоростей течения метана в различные моменты времени протекания ГДЯ



Таблица 2 – Количество выбросов, произошедших в результате ведения взрывных работ

Страна	Количество выбросов, %
Франция	65-95
Германия	более 65
Великобритания	более 60
Канада	90-93
Китай	около 70
Польша	70

Выполним расчёт для случая взрывания зарядов 1-3 с длиной шпуров  $\ell_{ш} = 2,0$  м. Получим распределения геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени.

На рис. 32 показаны изолинии относительного давления метана и рост полости выброса в различные моменты времени. Видно, что в момент взрыва в зоне взрывания шпуровых зарядов давление образующихся газов превосходит давление метана в нетронутом массиве. Одновременно происходит резкое снижение давления метана в пространстве между плоскостью забоя и плоскостью взрывания – образуется полость с глубиной, приблизительно равной  $\ell_{ш}$ , рис. 32 а. Откол угля и породы вызывает мгновенное обнажение новой поверхности забоя. Минимальная компонента тензора напряжений на этой поверхности равна нулю, а в непосредственной близости к ней ещё сохраняются значительные сжимающие напряжения области опорного давления. Это обуславливает возникновение высоких градиентов напряжений

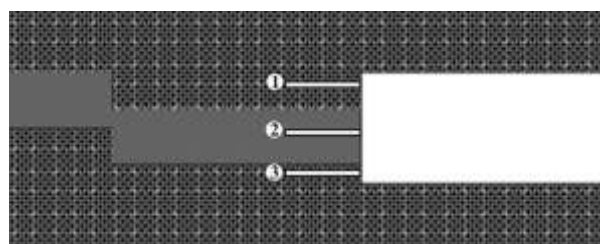


Рисунок 31 – Центральный фрагмент конечноэлементной сетки с шпурами для отбойки угля и породы (1-3)

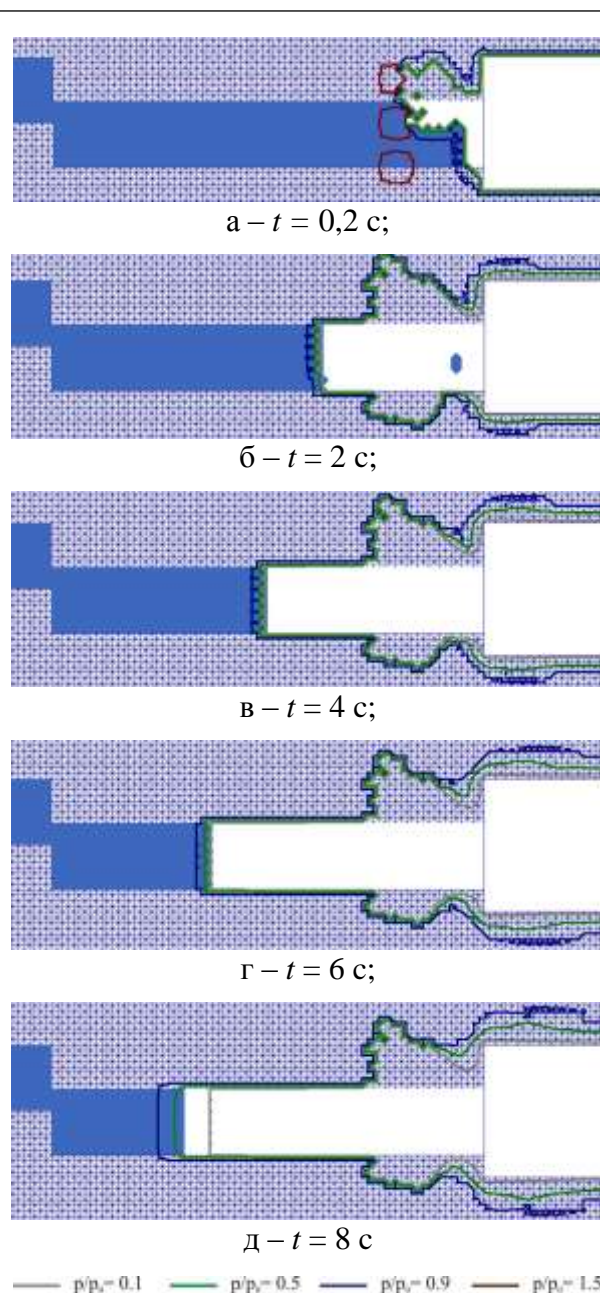


Рисунок 32 – Относительное давление метана и рост полости выброса

на контуре образованной полости.

Кроме этого, большая площадь вновь образованной поверхности, высокие значения коэффициента проницаемости приконтурной части угольного пласта вызывают интенсивную десорбцию метана. Скорости фильтрации в этой зоне резко возрастают, газ начинает отрываться отделёнными трещинами кусочки (пластинки) угля, обнажается следующий поверхностный слой – и весь процесс повторяется снова.

Другими словами, происходит развитие самоподдерживающегося процесса выброса угля и метана, спровоцированного взрывом. Из расчётов следует, что время протекания динамического процесса – 7 с. В течение этого времени градиенты давления принимают очень высокие значения. Происходит образование полости выброса в угольном пласте, длина которой достигает 6,6 м.

Затем рост полости останавливается (рис. 32,д), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться, исчезает зона высокой проницаемости на фронте выброса – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму. Давление метано-воздушной смеси внутри полости выброса в течение процесса выброса так же, как и в случае проведения выработки комбайном, увеличивается с 0,1 до 3 МПа.

Сравним полученные распределения проницаемости на фронте выброса при проходке выработки буровзрывным и комбайновым способами, рис. 33.

При равных начальных и граничных условиях кривые изменения максимальной проницаемости на фронте выброса имеют значительные отличия: время протекания выброса при БВР уменьшается на 4 с за счёт сокращения второй стадии – стадии протекания процесса, при этом время инициации и затухания остаётся практически неизменным; проницаемость в начальный период процесса выброса при БВР в 1,5 раза выше за счёт влияния действия взрыва.

Изменение давления метана на фронте выброса при проходке буровзрывным и комбайновым способами отличается продолжительностью динамической стадии процесса и наличием пика давления в момент взрыва  $t = 0,2$  с.

Сравним полученные графики скоростей течения метана на фронте выброса при проходке выработки буровзрывным способом с данными по скоростям при проходке комбайном, рис. 34. При прочих равных условиях кривые изменения максимальных скоростей течения газа на фронте выброса имеют следующие отличия:

– время протекания выброса при БВР уменьшается на 4 с – процесс выброса протекает быстрее и имеет большую интенсивность;

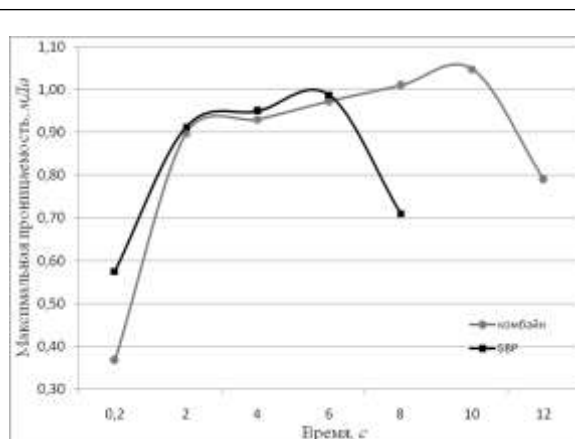


Рисунок 33 – Сравнение проницаемости на фронте разрушения при комбайновом и буровзрывном способах проходки

- максимальные скорости течения газа в начальный период процесса выброса при БВР в 17,3 раза выше за счёт влияния действия взрыва;
- в период протекания на фронте выброса в 1,4 раза выше при БВР;
- в период затухания процесса выброса скорости фильтрации метана при БВР также остаются более высокими – в 1,3 раза.

**Моделирование газодинамических процессов при бурении опережающих скважин в забое выработки.** Одним из способов предотвращения выбросов угля и газа в подготовительных и очистных выработках является бурение опережающих скважин. Вокруг скважины впереди движущегося забоя под действием горного давления создаётся разгруженная и дегазированная область, размеры которой оцениваются условно как радиус эффективного действия скважины. Опережающие скважины бурятся по наиболее перемятой угольной пачке, их параметрами являются диаметр, длина, радиус эффективного влияния, величина опережения, расстояние между забоями скважин. Диаметр скважин составляет 80-250 мм, длина не ограничивается [14].

Однако, зачастую выбросы происходят непосредственно при бурении самих опережающих скважин, т.е. в процессе проведения противовыбросных мероприятий. Для детального изучения этого явления проведём серию вычислительных экспериментов, моделирующих поведение газонасыщенного углеродного массива вокруг одиночной горной выработки с пробурённой в её забое скважиной вблизи зоны тектонически нарушенного угля.

Рассмотрим случай, когда забой выработки высотой 3 м остановлен на расстоянии 11,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м, вокруг которого находится десятиметровая зона перемятого угля. Мощность угольного пласта 1,5 м, глубина проведения выработки – 1200 м. Газоносность угля –

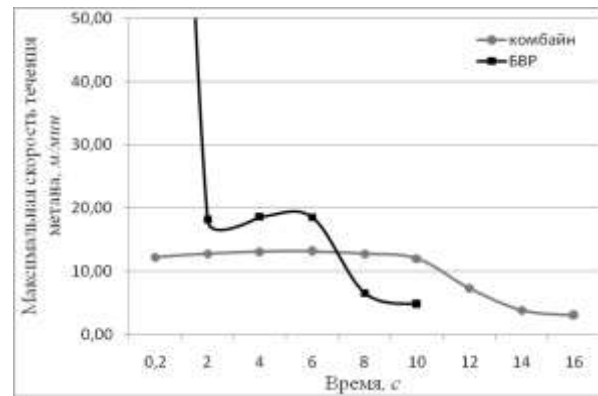
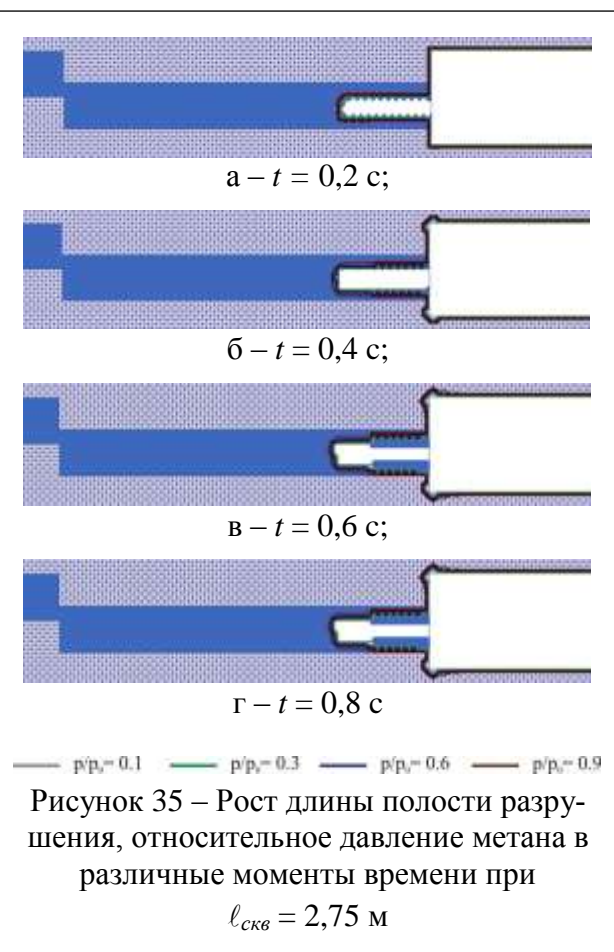


Рисунок 34 – Сравнение скоростей течения метана на фронте разрушения при комбайновом и буровзрывном способах проходки



20 м<sup>3</sup>/т, содержание метана в свободной форме – 10 %, в сорбированной – 90 %. Вмещающая порода – аргиллит. Для проведения противовыбросных мероприятий в забое выработки по угольному пласту бурят опережающие скважины Ø250 мм.

Проведём расчёты и посмотрим, что происходит при внедрении бурового инструмента в выбросоопасную зону и как зависит формирование полости выброса от длины скважины. На рис. 35 показано развитие динамических процессов во времени при длине скважины  $l_{скв} = 2,75$  м. Как можно видеть, время протекания динамических процессов в этом случае составляет всего 0,6 с, затем фильтрационные и геомеханические процессы возвращаются к квазистационарному режиму. За это время образовывается небольшая полость, длина которой 0,25 м, а диаметр в 2 раза превышает диаметр скважины.

При увеличении длины скважины на 0,5 м ( $l_{скв} = 3,25$  м) получим такой же результат: время протекания динамических процессов – 0,6 с, длина образовавшейся полости – 0,25 м, диаметр в 2 раза превышает диаметр скважины.

Как отмечал Николин В.И. [9], многочисленные наблюдения показывают, что при бурении скважин в угле небольшой и средней прочности их диаметр увеличивается на (20-30) %. Однако на отдельных пластах (пачках угля), сложенных углём небольшой прочности, а также в зонах тектонических нарушений независимо от прочности угля диаметр скважины часто увеличивается гораздо больше, чем на 30 %, и сопровождается большим выходом штыба. А выброс (выдувание) штыба и газа при бурении скважин (шпуров) является одним из предупредительных признаков, которые предшествуют внезапному выбросу угля и газа [9].

Очевидно, что именно это явление и наблюдается при моделировании бурения скважины вблизи выбросоопасной зоны при длине скважины  $l_{скв} \leq 3,25$  м, рис. 35.

Увеличим длину скважины ещё на 0,5 м. Теперь её длина составит  $l_{скв} = 3,75$  м. В этом случае повышенный выход штыба перерастает в выброс угля и газа, рис. 36.

Длина полости выброса составляет 10,375 м (учитывая и длину скважины), время протекания процесса – 12 с.

На рис. 37 показаны графики изменения скоростей фильтрации метана в трещинно-поровом пространстве угольного пласта при  $l_{скв} = 2,75; 3,25$  и 3,75 м. Видно, что в первых двух случаях, при  $l_{скв} \leq 3,25$  м, скорости течения практически совпадают. В течение первых 0,6 с они находятся в пределах (30-32) м/мин, затем резко уменьшаются в полтора раза и далее практически не изменяются. В случае  $l_{скв} = 3,75$  м видно, что график изменения скорости имеет три ступени. Первая – повышение скоростей, связанное с выдуванием штыба аналогично первым двум случаям, продолжается до 1 с. Вторая – повышение скоростей во время протекания выброса, длится с 1 по 10-ю с. Третья – стабилизация скоростей на определённом уровне, переход процессов к квазистационарному режиму, на рис. 37 начинается с 10-ой с.

В качестве примера, иллюстрирующего подобную ситуацию, можно привести случай, описанный Николыным В.И. [9]. Для уменьшения числа и силы выбросов, происходящих при ведении взрывных работ в лаве на шахте «Новая Руда» (ПНР) бурили скважины диаметром 42 мм и глубиной (10-15) м, расстояние между скважинами по длине лавы 3 м. Скважина на глубину 6 м была пробурена накануне. Но из-за того, что пласт «вёл себя во время бурения беспокойно», было принято решение бурение прекратить, дать пласту возможность «успокоиться» и продолжить бурение на следующий день. При дальнейшем бурении скважины был отмечен повышенный выход штыба, переросший при глубине бурения 9 м во внезапный выброс. Было выброшено примерно 1500 т угля и 180 тыс.м<sup>3</sup> углекислого газа. Т.е. при приближении к выбросоопасной зоне, так же, как и в приведённых выше расчётах, наблю-

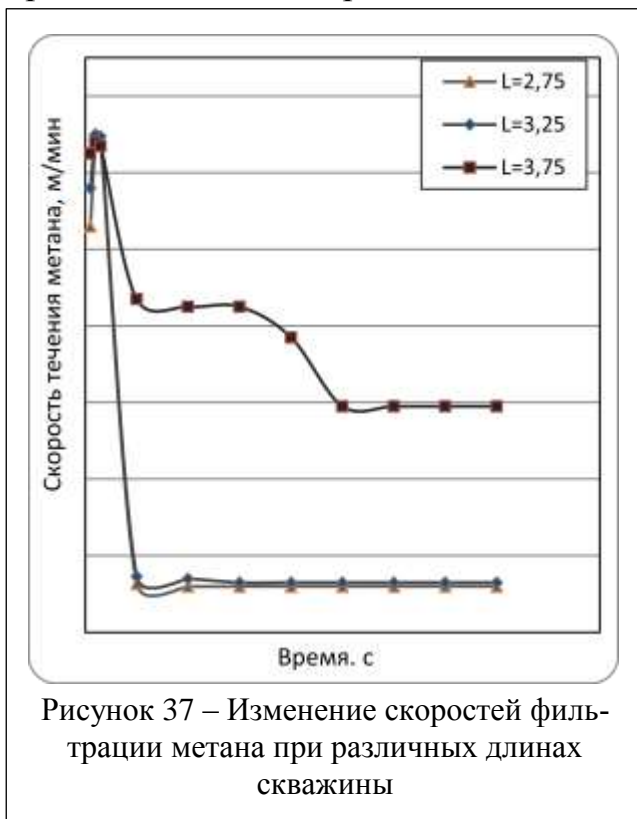


Рисунок 37 – Изменение скоростей фильтрации метана при различных длинах скважины

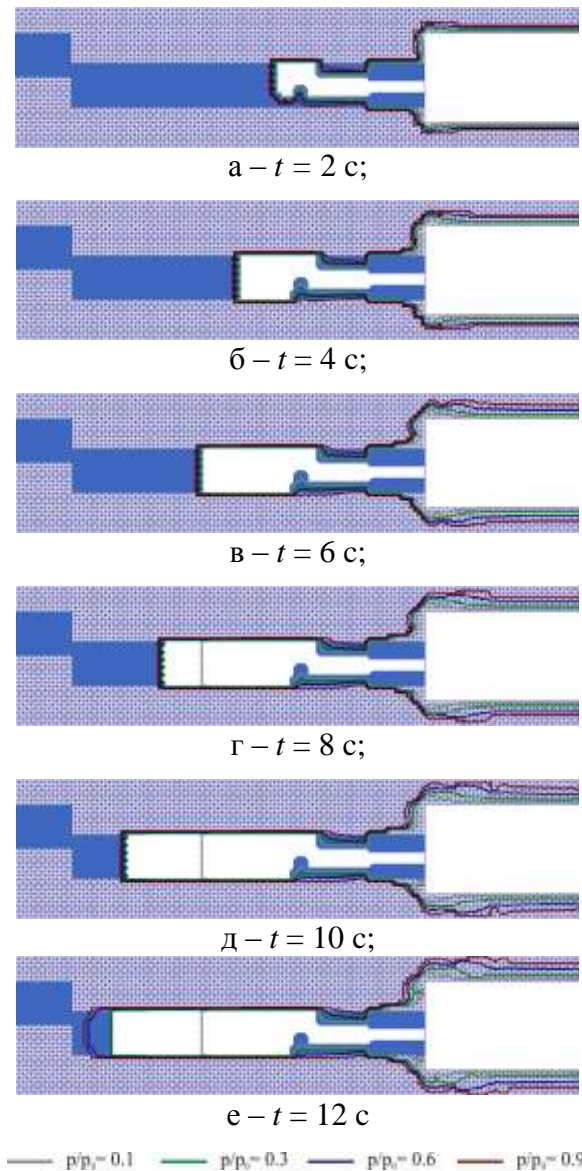


Рисунок 36 – Относительное давление метана при  $l_{скв} = 3,75$  м

дались небольшие газодинамические явления, которые при увеличении длины скважины и внедрении её в опасную зону переходят в процесс выброса угля и газа.

По результатам выполненной работы сделаны следующие выводы. При моделировании газодинамических процессов в забое одиночной выработки в зоне тектонического нарушения отчётливо прослеживается деление процесса на стадии инициирования, протекания выброса и его за-

тухания. Значительное увеличение фоновой проницаемости происходит на расстоянии (0,1-0,3) м от свободной поверхности фронта разрушения. Давление метана в течение основного времени протекания процесса резко падает с 8 МПа в глубине массива до (0,1-2) МПа на свободной поверхности полости выброса, на расстоянии 0,15 м; градиенты давления метана на этом промежутке принимают большие значения, что обуславливает развитие скоростей течения метана, достаточных для разрыва расслоившегося угля на мелкие пластинки и выноса их на большие расстояния вглубь выработки. Давление метано-воздушной смеси внутри полости выброса увеличивается с 0,1 почти до 3 МПа из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля и временного повышения давления воздуха в самой выработке. Основной приток метана в трещинное пространство угля, максимальная интенсификация десорбционных процессов происходит на стадии протекания процесса выброса на расстоянии (0,05-0,25) м от свободной поверхности, в атмосферу выработки максимальное количество метана выделяется в этот же период времени.

Проведено моделирование протекания газодинамических процессов при бурении опережающих скважин в забое выработки. Показано, что при приближении к выбросоопасной зоне наблюдаются небольшие газодинамические явления, которые при увеличении длины скважины и внедрении её в опасную зону переходят в процесс выброса угля и газа.

При равных начальных и граничных условиях время протекания ГДЯ при БВР уменьшается на 4 с за счёт сокращения второй стадии – стадии протекания процесса, при этом время инициации и затухания остаётся практически неизменным; проницаемость в начальный период процесса выброса при БВР в 1,5 раза выше за счёт влияния действия взрыва. Максимальные скорости фильтрации метана при БВР в начальный период процесса в 17,3 раза выше за счёт влияния действия взрыва; в период протекания на фронте разрушения выше в 1,4 раза; в период затухания также остаются более высокими – в 1,3 раза.

### **6 Исследование связанных процессов изменения НДС массива, фильтрации газа и взрывного воздействия при проходке выработки буровзрывным способом**

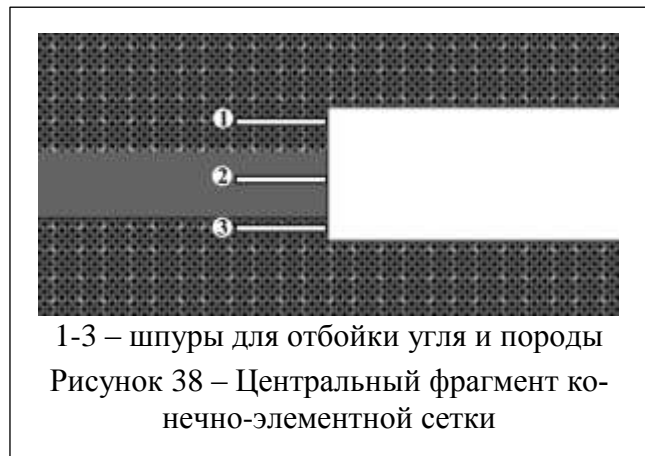
Взрывные работы на выбросоопасных пластах ведутся в режиме сотрясательного взрывания, направленного на защиту людей от опасных последствий внезапных выбросов. В результате организации производства взрывных работ с применением специальных схем расположения и взрывания шпуровых зарядов при отсутствии людей в проводимой выработке и в опасной зоне либо провоцируются выбросы угля и газа либо снижается их частота и интенсивность. Заряды ВВ по углю рассчитываются как заряды камуфлетного рыхления для того, чтобы создать вокруг шпуров системы трещин. В этом случае происходит интенсивная дегазация угольного пласта и снятие напряжённого состояния в пределах контура выработки.

Рассмотрим случай, когда выработка высотой 3 м проводится по угольному пласту мощностью 1,5 м на глубине 1000 м. Газоносность угля – 20 м<sup>3</sup>/т. Вмещающая порода – аргиллит. Свойства пород приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики пород

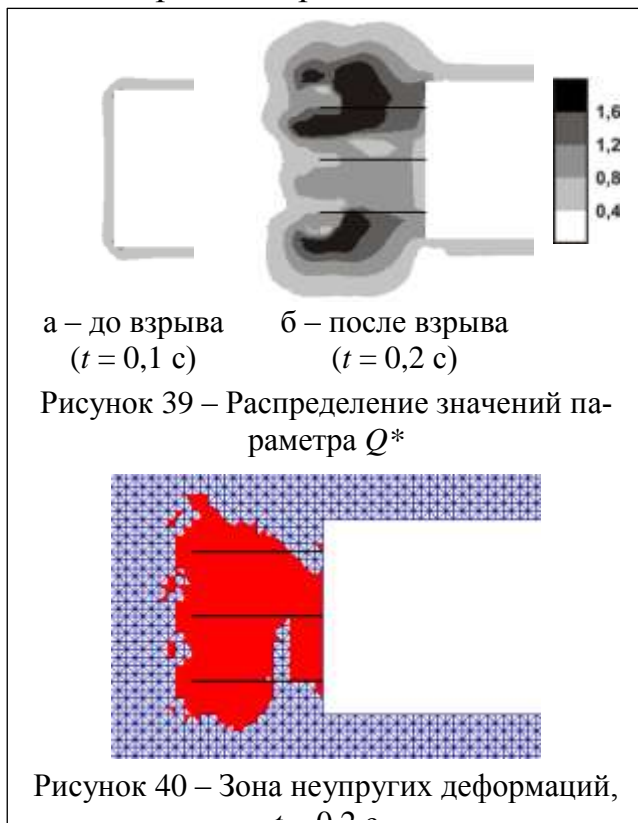
Порода	Модуль упругости, $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, $C$ , МПа	Угол внутреннего трения, град	Прочность на растяжение, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука в породе, м/с
Аргиллит	$10^4$	0,35	3,5	30	2	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
Уголь	$5 \cdot 10^3$	0,3	1,75	30	1	$1,25 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$

Выработка проводится буровзрывным способом ( $R_0 = 0,02$  м, длина шпуров  $l_{ш} = 2$  м). Конечноэлементная сетка, шпуров для отбойки угля и породы (1-3) показаны на рис. 38. Шаг по времени составляет 0,1 с. Взрывание происходит в момент времени  $t = 0,2$  с. При выполнении расчёта для случая взрывания зарядов 1-3 получим распределение геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени.

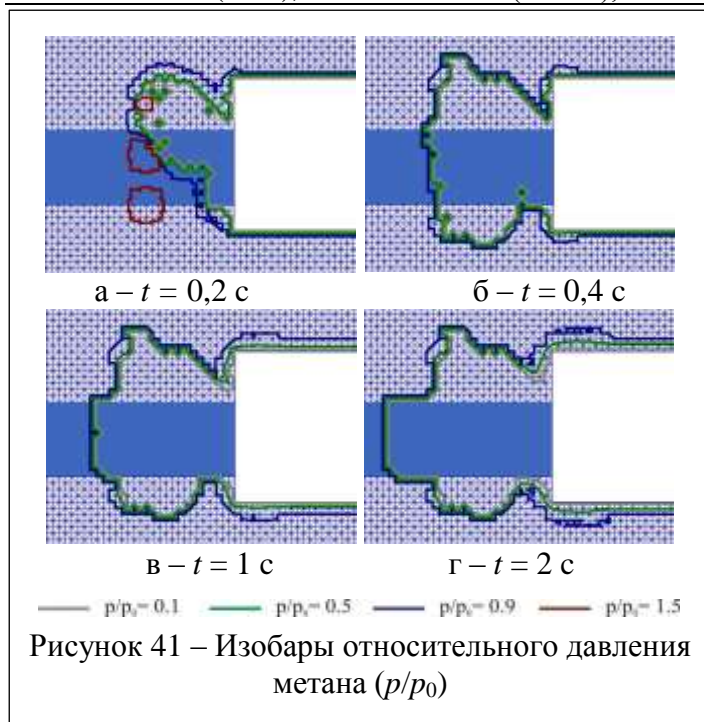


На рис. 39 показано распределение значений параметра  $Q^*$ .

На рис. 40 представлена область неупругих деформаций в забое выработки в момент взрыва. Из рисунков видно, что в результате взрывов изменяется распределение напряжений в забое выработки. Вокруг каждого из зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, эти зоны от трёх центров взрывов объединяются и формируют единую область глубиной  $l_{ш}$ .



Далее расположена зона нарушенных пород с повышенной трещиноватостью. На рис. 39,б можно видеть, что значения параметра  $Q^*$  в угольном пласте меньше, чем во вмещающих породах. Это связано с различиями прочностных свойств угля и аргиллита – разрушение угля происходит при меньших значениях напряжений.



Прилежащая к забою область, рис. 40, разрушается в результате действия отражённой от поверхности забоя волны растяжения.

На рис. 41 приведены изобары относительного давления метана перед забоем выработки.

Видно, что относительное давление газа в разрушенной области меньше 0,1 – т.е. практически равно давлению воздуха в выработке. В центрах взрывов давление газа высоко, рис. 41,а, но на следующих итерациях, рис. 41,в,г, происходит интенсивная дегазация угольного пласта, давление

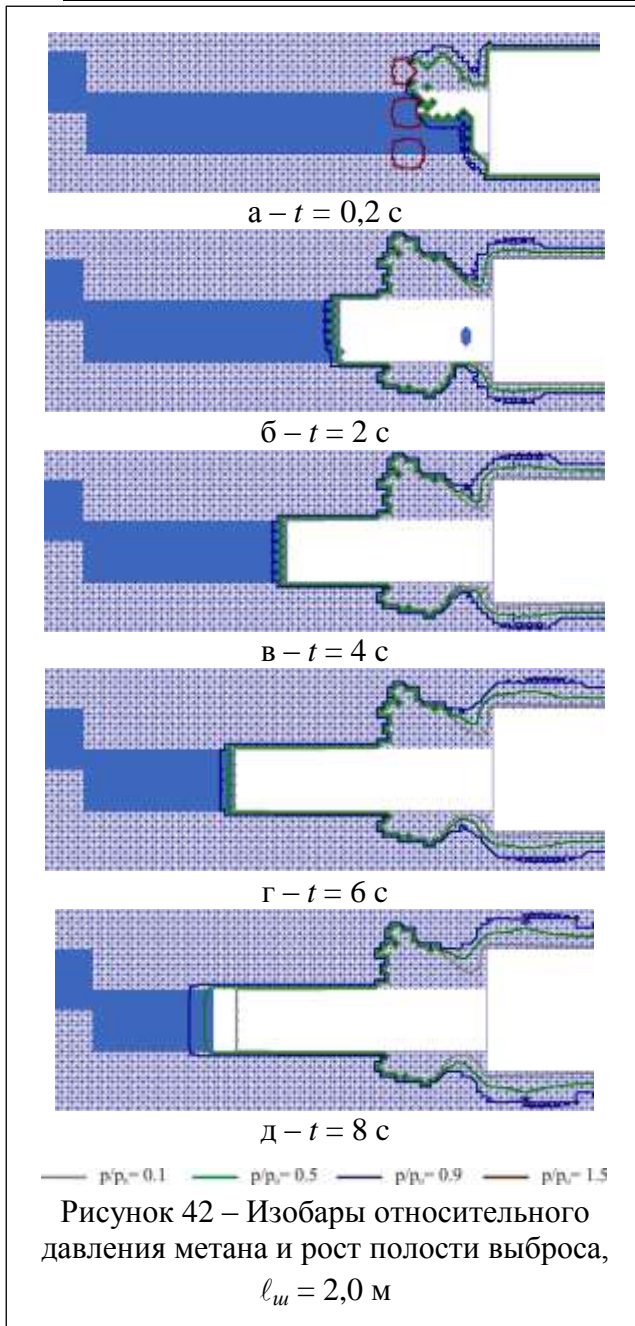
метана в нём быстро снижается.

**Влияние длины шпуров при БВР на изменение параметров протекания газодинамических процессов.** Рассмотрим предыдущие условия проведения горной выработки, при условии, что её забой находится на расстоянии 9,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м, вокруг которого расположена десятиметровая зона перемятого угля. Радиус заряда  $-R_0 = 0,025$  м. Выполним расчёт для случая взрывания зарядов 1-3 с длиной шпуров  $\ell_{ш} = 1,4; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$  м. Получим распределения геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени. Анализ полученных данных показывает, что в первых двух случаях после взрывания шпуровых зарядов начинает развиваться процесс выброса угля и метана, рис. 42.

В момент взрыва,  $t = 0,2$  с, в точках взрывания давление газа высоко, но уже на следующих итерациях зоны повышенного давления исчезают, в местах взрывов образуется полость, сообщающаяся с выработкой, давление газа в ней практически равно атмосферному. В случае  $\ell_{ш} = 2,0$  м время протекания динамического процесса – 7 с. В течение этого времени градиенты давления принимают очень высокие значения. Происходит образование полости выброса в угольном пласте, длина которой достигает 6,6 м. Затем рост полости останавливается (рис. 42,д), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

При  $\ell_{ш} = 3,0$  м развитие процесса выброса начинается на 5-ой секунде. В этом случае время протекания динамического процесса составляет 3 с, в течение которых образуется полость длиной 5,5 м. Вплоть до начала выброса в мас-





ция происходит постепенно, в течение 30 с.

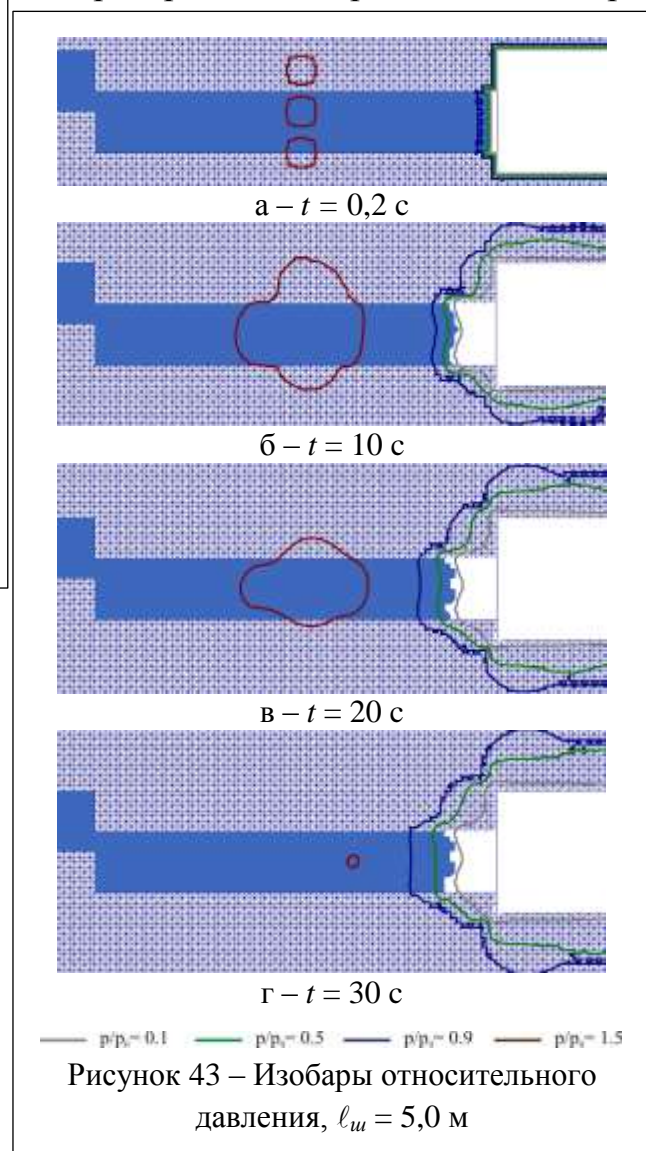
В забое выработки, в угольном пласте, образуется небольшая полость. Из-за малости объёма выпавшего угля это явление следует отнести скорее к вывалу или высыпанию угля.

По результатам имитационного моделирования можно сделать следующие выводы. Развитие процесса выброса угля и метана в выбросоопасной зоне тектонического нарушения при

сиве, в области взрывания зарядов сохраняется зона повышенного давления газа, которая исчезает только когда полость выброса достигает её границ.

На рис. 43 приведены изобары относительного давления газа перед забоем выработки, когда длина шпуров равна 5,0 м.

Как видно, при  $\ell_{\text{ш}} = 5,0$  м (так же, как и при  $\ell_{\text{ш}} = 4,0$  м) процесс выброса угля и метана не развивается. Зона повышенного давления в области взрывания зарядов исчезает в результате фильтрации газа по нарушенному угольному пласту и породам в пространство выработки. Филтра-



проведении выработки буровзрывным способом зависит от длины шпуров для отбойки угля и породы. При  $l_{ш} < 3,0$  м, при данных начальных и граничных условиях, взрывание шпуровых зарядов сопровождается выбросом, который инициируется в результате суммарного действия растягивающих напряжений, возникающих в призабойной зоне, и отражённой от поверхности волны растяжения от взрыва шпуровых зарядов.

При  $l_{ш} = 3,0$  м процесс выброса инициируется с замедлением в 5 с. При  $l_{ш} > 3,0$  м выбросов угля и метана не происходит. Увеличение длины шпуров понижает вероятность возникновения выбросов угля и метана за счёт увеличения глубины зоны разгрузки призабойной части угольного пласта. Этот эффект используется для снижения интенсивности и частоты выбросов угля и метана при сотрясательном взрывании во время проведения подготовительных выработок смешанным забоем на особо выбросоопасных пластах, в зонах геологических нарушений и повышенного горного давления (способ передового рыхления угольного массива и вмещающих пород).

**Напряжённое состояние массива вокруг выработки с анкерной крепью при её проходке буровзрывным способом.** Известно, что системы анкерной крепи (АК) обеспечивают устойчивость и надёжность при длительной эксплуатации подготовительных и капитальных выработок в самых разнообразных условиях применения. Важнейшим требованием технологии их установки является возведение АК в неразгруженный от горного давления вмещающий массив. Тогда сразу же после установки анкерная крепь будет вовлечена в работу по противодействию силам горного давления и приконтурный массив сохранит природное монолитное, ненарушенное состояние. Иначе анкера будут только сшивать расслоившиеся породы кровли.

При проведении выработки по выбросоопасному пласту применяется буровзрывной способ проходки, нарушающий природную монолитность пород. Расчёт поля напряжений вокруг забоя выработки с анкерной крепью перед, в момент и после взрывания шпуровых зарядов позволит оценить влияние взрыва на устойчивость АК, её способность удерживать породы кровли в ненарушенном состоянии. Вентиляционный ходок 5 восточной уклонной лавы пласта  $k_2^H$ , горизонт 956 м, ПАО «Краснодонуголь» шахта «Самсоновская-Западная», проводится по угольному пласту сложного 4-пачечного строения, табл. 4.

Таблица 4 – Свойства пород

Наименование пород	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Коэф-ент крепости	Природная газоносность, м <sup>3</sup> /т
Песчаник	68-89	7-9	7-9	2-2,5
Угольный пропласток $k_2^B$	–	–	1-2	20-25
Аргиллит	24-38	3-4	3-4	–
Алеврит	42-67	3-5	4-7	–
Угольный пласт $k_2^H$	–	–	1-1,5	20-25

Угольный пласт  $k_2^H$  и пропласток  $k_2^B$  опасны по внезапным выбросам угля и газа, песчаники опасны по выбросам породы и газа. Угол падения пласта 3-6°.

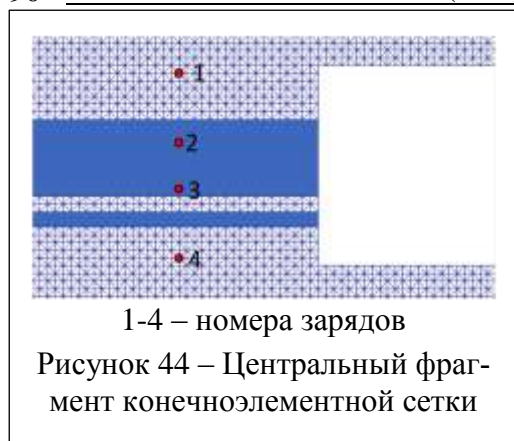


Рисунок 44 – Центральный фрагмент конечноэлементной сетки

Глубина проведения выработки – 1150-1160 м. Вентиляционный ходок 5 восточной уклонной лавы крепится анкерной крепью по следующей схеме – усиленная АК с перемычками АКпт, устанавливаемыми через 20 м.

Способ проведения выработки – буровзрывной, в режиме сотрясательного взрывания. Тип применяемого взрывчатого вещества – П-5; 13П, величина заряда каждого шпура – 0,6; 0,9 кг, взрывание производится за 1 приём. Глубина шпуров – 2,0 м. Подвигание забоя

– 1,8 м.

Рассмотрим продольное сечение, конечноэлементная сетка для которого показана на рис. 44.

При выполнении расчёта получим распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций. На рис. 45 показано распределение значений параметра  $Q^*$ , на рис. 46 – зоны неупругих деформаций для выработки с АК.

Видно, что в результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое и кровле выработки. Вокруг зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, распространяющаяся вплоть до поверхности забоя выработки (область неупругих деформаций, рис. 46,б. Вокруг первого и четвёртого зарядов расположены зоны сильно нарушенных пород (тёмно-серый цвет,  $0,8 < Q^* < 1,2$ ), далее – зона повышенной трещиноватости (светло-серый цвет,  $0,4 < Q^* < 0,8$ ), рис. 45,б. Образованная в результате взрывания зарядов полость видна на рис. 45,в, на следующей временной итерации.

Подвигание забоя составляет примерно 1,8 м.

Концентрация напряжений в массиве вокруг вновь сформированного забоя в этот момент очень велика, параметр  $Q^* > 1,6$ . В кровле выработки, наоборот, породы ещё не разгружены от горного давления и здесь параметр  $Q^* < 0,4$ . Этот момент времени благоприятен для установки следующего ряда АК.

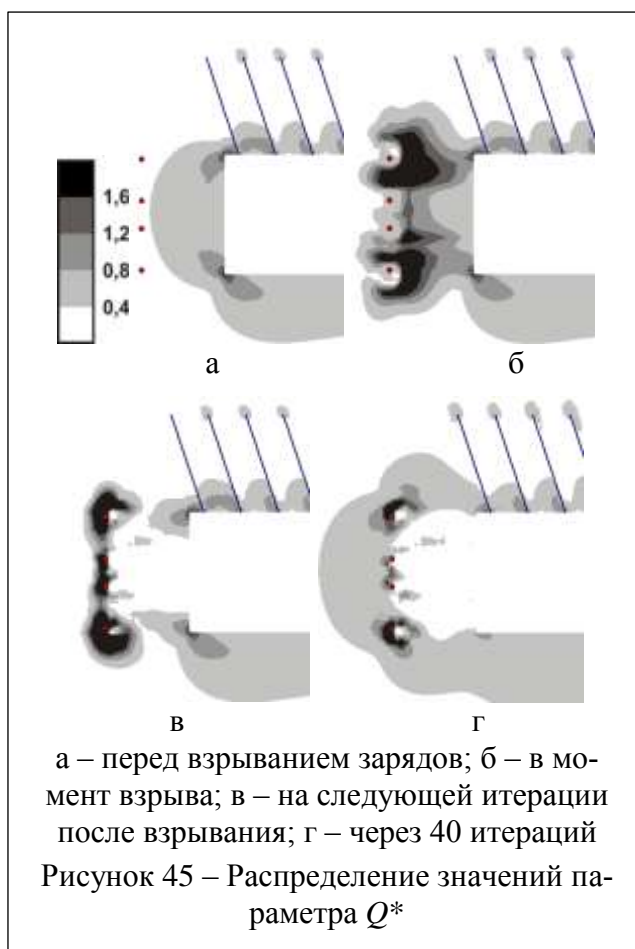
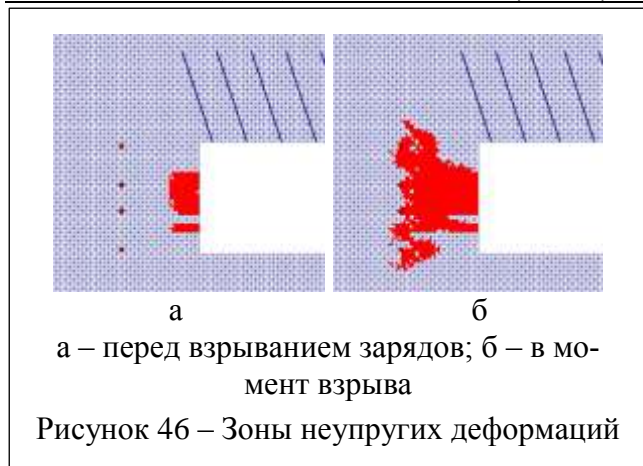


Рисунок 45 – Распределение значений параметра  $Q^*$



качественное породно-анкерное перекрытие. Максимальные значения разностности поля напряжений наблюдаются в области первого и четвертого зарядов, в аргиллите, как более прочной по сравнению с углём среде, рис. 45.

В кровле выработки породы сохранены в природном, ненарушенном состоянии, значения параметров  $Q^*$  и  $P^*$  находятся в допустимых пределах, зоны неупругих деформаций в заанкерванной области не развиваются.

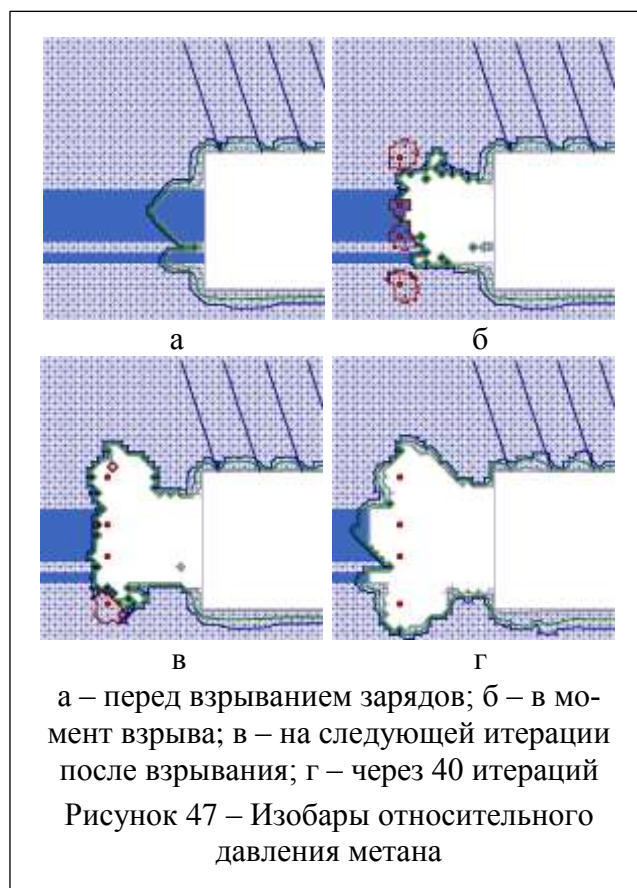
Рассмотрим изменение во времени распределения давления газа в забое выработки, рис. 47. В результате взрывания зарядов 1-4 вокруг каждого из них образуется зона полностью разрушенных пород, эти зоны от четырёх центров взрывов объединяются и формируют единую область глубиной  $\ell_{us}$ , проницаемость внутри которой очень велика.

Из рис. 47,б-г видно, что относительное давление газа в разрушенной области меньше 0,1 – т.е. практически равно давлению воздуха в выработке. Перед взрыванием зарядов ВВ угольный пласт уже частично дегазирован, рис. 47,а. Давление газообразных продуктов детонации в центрах взрывов очень высоко в момент взрывания, рис. 47,б-в, но на следующих итерациях, рис. 47,г оно падает. В течение всего расчётного времени происходит интенсивная дегазация угольного пласта – давление метана в нём быстро снижается.

Исследуем изменение геомеханических и фильтрационных параметров на прямой, проходящей по центру угольного пласта перпендикулярно забою (2).

Максимальная величина разностности поля напряжений перед взрыванием шпуровых зарядов

Постепенно происходит перераспределение поля напряжений: область с  $Q^* > 1,6$  уменьшается, а зона повышенной трещиноватости, в которой  $0,8 < Q^* < 1,2$ , распространяется далеко вглубь массива, рис. 45,г. Если проводить установку следующих рядов АК в это время, с запаздыванием, то АК уже не сможет вернуть вмещающему массиву утраченную монолитность, и не будет сформировано



наблюдалась на расстоянии до 1,0 м от поверхности забоя, рис. 48. В момент взрыва и после него пиковые значения параметра  $Q^*$  соответствуют положению шпуровых зарядов, рис. 48. С течением времени, после подвигания забоя и образования новой свободной поверхности на уровне 1,8 м, максимум разнокомпонентности поля напряжений перемещается до отметки 2,0-2,7 м.

Изменение параметра  $P^*$ , характеризующего величину разгрузки пород от горного давления, отличается снижением его значений вблизи поверхности забоя, рис. 49. При взрыве вокруг зарядов ВВ сохраняются области высоких значений параметра  $P^*$  – в этот момент поле напряжений здесь практически равнокомпонентно.

В момент образования полости от взрыва шпуровых зарядов разгруженная зона начинает перемещаться вглубь массива, минимум напряжений наблюдается перед зарядами и достигает значения 0,4. На следующей временной итерации этот минимум опускается до 1,5, а затем, после подвигания забоя, область разгруженных пород уже соответствует новому положению забоя, её координата по оси  $x$  – 2,0 м.

В результате проведённого анализа изменения геомеханических и фильтрационных параметров в забое выработки с анкерной крепью при её проходке буровзрывным способом показано, что породно-анкерное перекрытие сохраняет вмещающие породы в ненарушенном состоянии даже при ведении БВР. Однако время между взрыванием зарядов и установкой следующего ряда АК должно быть минимальным, пока породы в кровле выработки ещё не разгружены от горного давления.

Метод расчёта параметров связанных процессов изменения напряжённо-деформированного состояния, фильтрации газа и действия взрыва в слоистом массиве при проведении выработки буровзрывным способом, позволяющий проводить расчёт параметров НДС массива во время взрывания шпуровых зарядов с учётом существующих полей напряжений, использован при подготовке рекомендаций по проведению и анкерному креплению 19 выработок ПАО «Краснодонуголь». Применение разработанного метода позволило обосновать такие параметры технологии АК, как отставание ряда анкеров от забоя, плотность их установки и угол наклона на забой, повысить устойчивость выработок, проводимых буровзрывным способом, сократить затраты на

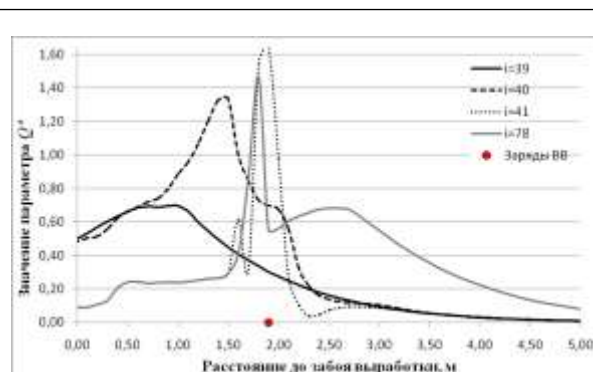


Рисунок 48 – Величина разнокомпонентности поля напряжений в различные моменты времени

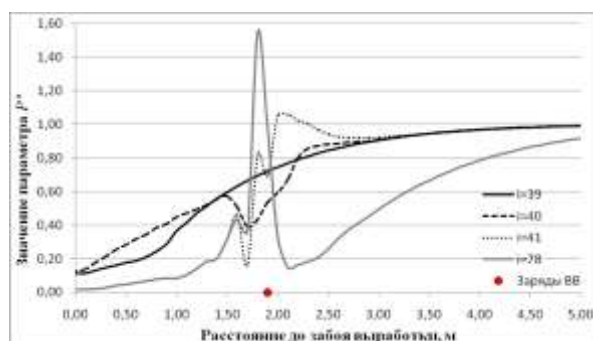


Рисунок 49 – Величина разгрузки от горного давления ( $P^*$ )

их проведение и поддержание в течение всего срока службы, снизить трудоёмкость операций по поддержанию кровли на сопряжениях лав с выемочными штреками и повысить безопасность труда горнорабочих.

### **7 Моделирование связанных процессов изменения НДС массива и двухфазной фильтрации газа при гидровоздействии на угольный пласт**

В практике ведения горных работ для снижения концентрации напряжений и предотвращения газодинамических явлений в забоях выработок применяются гидроимпульсное и гидродинамическое воздействия. Обосновать параметры технологии применения этих методов возможно с помощью методов имитационного моделирования процессов, происходящих в забое горной выработки при гидровоздействии на угольный пласт [15].

Последовательность моделируемых технологических операций с параметрами гидрорыхления, принятыми для этого расчёта: бурение технологических скважин на глубину 3,0 м, замер начальной скорости газовыделения; добуривание скважин до 6,0 м, их герметизация на глубину 4,0 м, гидрорыхление пласта в статическом или импульсном режиме; бурение контрольных шпуров до глубины 3,0 м и замер начальной скорости газовыделения; подвигание забоя на 3,0 м.

Во время гидроимпульсного воздействия закачиваемая в скважину жидкость перемещается вглубь пласта, оттесняя метан. При достаточно высоком давлении воды происходит увеличение трещиноватости и расширение области фильтрации (области гидровоздействия). Влага проникает далеко вглубь пласта, смачивая внутреннюю поверхность трещинно-порового пространства и перекрывая мелкие трещины для движения газа. После сброса давления жидкости в скважине большая часть воды уходит и начинается процесс обратной фильтрации метана в расширившейся области фильтрации вокруг незагерметизированной части скважины.

По блок-схеме, представленной на рис. 3, решим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} k = k_w + k_g = 100\%; \\ \sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = \rho_s \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right); \\ \frac{\partial p}{\partial t} + k_g \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0; \\ \frac{\partial s}{\partial t} + k_w \left( \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right) = 0; \\ s_w + s_g = 1, \end{array} \right.$$

где  $K$  – абсолютная проницаемость, вычисляется по формулам (11), мДа;  $K_w$  – фазовая проницаемость для жидкости, мДа;  $K_g$  – газовая проницаемость, мДа.

Начальные условия для процессов: изменения НДС ( $\Pi_1$ ), фильтрации воды ( $\Pi_2$ ), фильтрации газа ( $\Pi_3$ ) приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Начальные и граничные условия для рассматриваемых связанных процессов

	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub>	П <sub>3</sub>
Начальные условия	$\sigma_{yy} _{t=0} = \gamma H$ $\sigma_{xx} _{t=0} = \lambda \gamma H$	$s _{t=0} = 0$	$p _{t=0} = p_0$ $p_0 = 0,8 \cdot \gamma_s H$
Граничные условия	$u_x _{\Omega_1} = 0$ $u_y _{\Omega_2} = 0$ $\sigma_{yy} _{\Omega_3} = 20 \text{ МПа}$	$s _{\Omega_3} = 100 \%$	$p _{\Omega_4(t)} = p_0$ $p _{\Omega_5} = 0,1 \text{ МПа}$

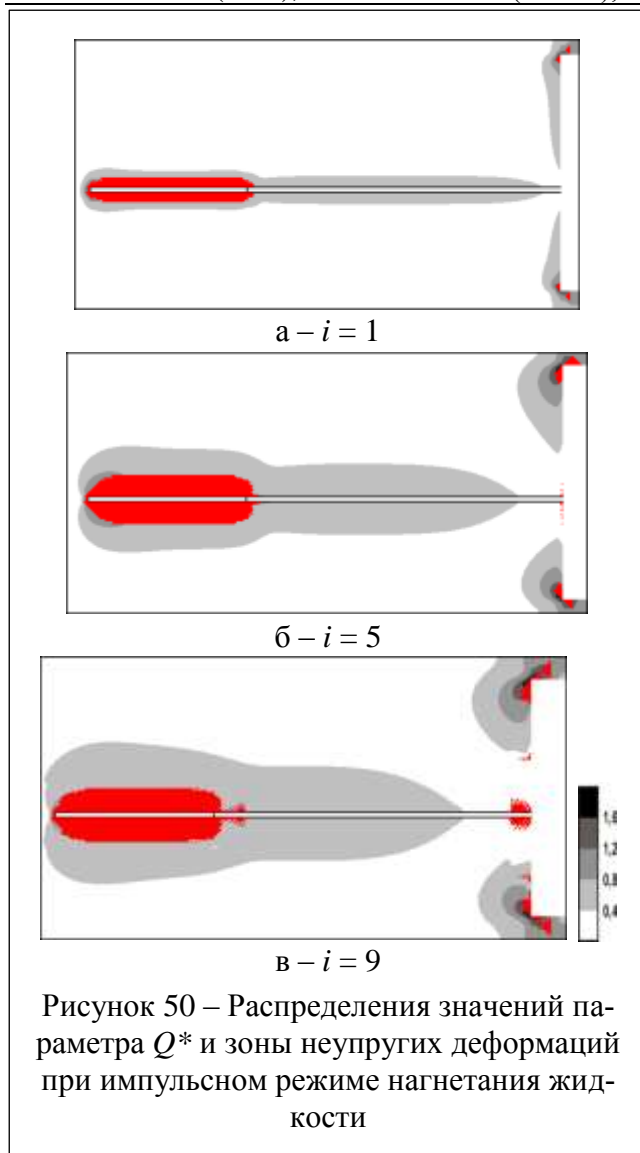
В таблице обозначено:  $\Omega_1$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_2$  – горизонтальные границы внешнего контура;  $\Omega_3$  – контур незагерметизированной части скважины;  $\gamma_s$  – плотность воды;  $\Omega_4(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_5$  – внутренний контур (выработка).

Амплитуда изменения давления жидкости в скважине – 20 МПа. Исследования протекания перечисленных выше связанных процессов в забое выработки проводились при гидрорыхлении пласта в импульсном режиме нагнетания жидкости в угольный пласт. При моделировании было принято: природная газоносность пласта  $x = 20 \text{ м}^3/\text{т}$ ; мощность пласта  $m = 1,5 \text{ м}$ ; глубина бурения технологических скважин  $6,0 \text{ м}$ ; глубина герметизации  $\ell_2 = 4,0 \text{ м}$ ; глубина залегания  $H = 1000 \text{ м}$ . Моделирование режима воздействия жидкостью на угольный пласт в фильтрационной части скважины осуществляется посредством приложения соответствующей нагрузки в узлах незагерметизированной части скважины в начале расчёта на временных итерациях  $i = 1$ ,  $i = 3$  и  $i = 5$ .

На шестой итерации происходит сброс давления жидкости в скважине и оценка эффективности способа, после чего, на 10-й итерации – подвигание забоя, затем начинается замер объёма метана, выделившегося в контрольный шпур, в единицу времени.

Выполним расчёт размеров области гидровоздействия на угольный пласт, геомеханических и фильтрационных параметров при импульсном нагнетании воды в угольный пласт. На рис. 50 показаны распределения значений геомеханического параметра  $Q^*$ , характеризующего степень разнокомпонентности поля напряжений в различные моменты времени.

Область повышенной разнокомпонентности ( $0,4 < Q^* < 0,8$ ) вокруг скважины увеличивается со временем. При импульсном воздействии вокруг фильтрационной части скважины формируется обширная область неупругих деформаций, которая возникает на 1-5 итерациях гидроимпульсного воздействия и далее остаётся неизменной. В этой области выполняется критерий Кулона-Мора и параметр  $P^* < 0,1 \div 0,3 \cdot \sigma_{сж} / \gamma H$ , что позволяет характеризовать её как область разрушения. Хрупкое разрушение угля характеризуется ростом деформаций, разрыхления и, соответственно, объёма материала. Это приводит к резкому росту проницаемости угля (коэффициент проницаемости принимает здесь макси-



пульсного воздействия показаны на рис. 52. Увлажнённые области с отеснённым метаном выделены изобарами  $p/p_0 \geq 1$ .

После прекращения нагнетания жидкости в скважину, 6-9 итерации, начинается медленная фильтрация метана в нарушенной области. Микротрещины и поры при этом ещё закрыты смачивающей фазой воды, поэтому отток метана из них затруднён. На 10-й временной итерации, рис. 52 г, происходит подвигание забоя выработки на 3,0 м. Фильтрация метана в угольном пласте продолжается и область, подвергаясь гидровоздействию, постепенно дегазирует-

мальные значения) и увеличению зоны равномерного гидрорыхления угольного пласта.

На рис. 51 приведены линии уровня насыщенности порового пространства водой в различные моменты времени при гидрорыхлении пласта в импульсном режиме воздействия. При прекращении гидроимпульсного воздействия, начиная с 6-й временной итерации, значения насыщенности жидкостью трещинно-порового пространства  $s$  в области фильтрации начинают снижаться. На 9-й итерации они падают до 5%, а в отдельных областях и ниже.

Изобары давления метана в различные моменты времени гидроим-

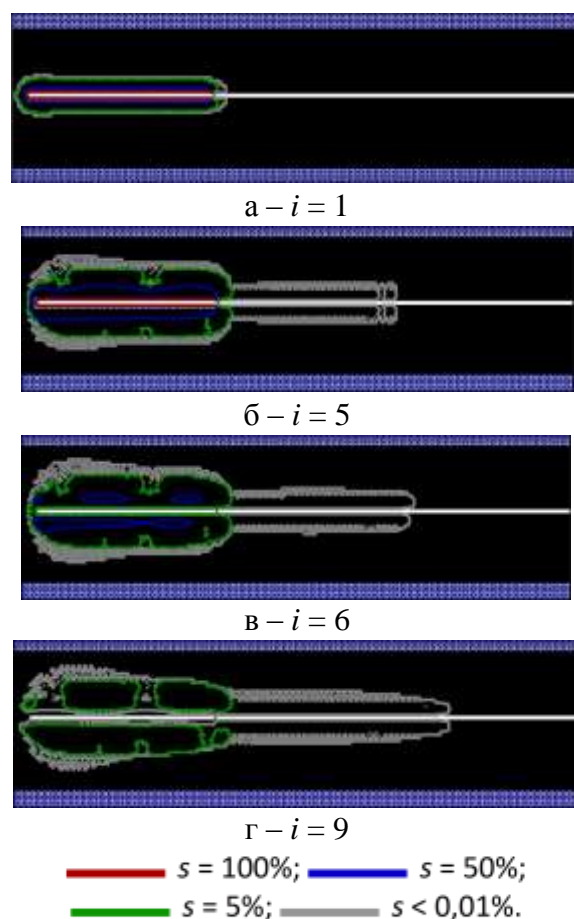


Рисунок 51 – Область гидровоздействия, изолнии насыщенности водой трещинно-порового пространства при импульсном режиме воздействия



ся, рис. 52 д.

При помощи разработанной математической модели связанных процессов изменения напряжённо-деформированного состояния углепородного массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа в нарушенной области при импульсном режиме нагнетания воды в скважину проведено исследование напряжённого состояния в забое выработки, распределения насыщенности водой и давления метана в угольном пласте вокруг технологической скважины.

### Выводы

Решена актуальная для угольной отрасли научная проблема развития теории связанных процессов в применении к геомеханике углепородного массива, которая состоит в разработке математических моделей и методов расчёта параметров связанных процессов геомеханики, установлении закономерностей совместного протекания деформационных, диффузионно-фильтрационных и других физических процессов, происходящих в углепородном массиве при упрочнении приконтурного массива анкерами, взрывном и гидровоздействии.

Введён критерий для оценки степени влияния каждого из связанных процессов на общий результат, позволяющий определить его значение в общем процессе, а также необходимость его учёта в математической модели. Этим критерием является средняя относительная разность значений параметров, характеризующих протекание общего процесса и общего без учёта одного из связанных процессов в исследуемой области. Показано, что пренебрежение учётом некоторых связанных процессов при математическом моделировании сложных физических процессов, происходящих в углепородном массиве, приводит к погрешностям, достигающим 250 %.

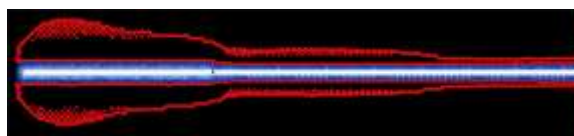
Впервые разработаны математические модели и методы расчёта параметров связанных процессов «деформирование массива с анкерной крепью – фильтрация метана», «деформирование массива с анкерной крепью – взрывное воздействие», «изменение напряжённого состояния массива в забое выработки – фильтрация метана – десорбция метана» при газодинамических процессах,



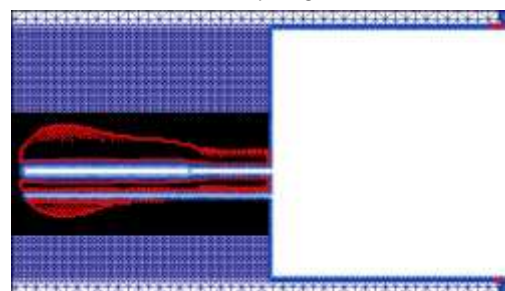
а –  $t = 1$



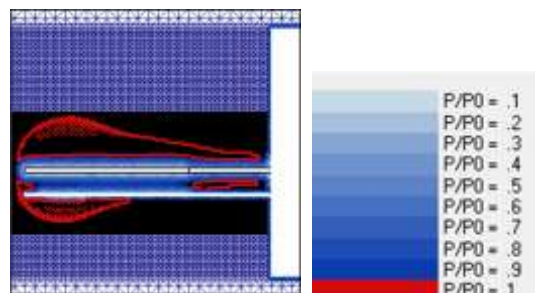
б –  $t = 5$



в –  $t = 6$



г –  $t = 10$



д –  $t = 25$

Рисунок 52 – Изобары относительного давления метана при гидроимпульсном воздействии

«изменение напряжённого состояния массива в забое выработки – двухфазная фильтрация жидкости и газа» при гидровоздействии.

Показано, что при протекании связанных процессов фильтрации метана и изменения НДС массива вокруг выработки с анкерной крепью в её кровле формируется непроницаемая породно-анкерная перемычка, которая разделяет область фильтрации на две не связанные между собой зоны и препятствует фильтрации метана из источников газовыделения, расположенных в кровле; причём с увеличением плотности установки анкеров до значения 1,1 анк/м средняя скорость фильтрации и расход метана снижаются на 75 %. Значение коэффициентов проницаемости, как параметров связи между геомеханическими и фильтрационными процессами, в боках выработки понижается на 20-30 % при установке каждого из боковых анкеров, в почве – на 40 % при установке трёх боковых, на 60 % при установке трёх боковых и одного почвенного анкеров за счёт сдерживания анкерной крепью процессов трещинообразования, сокращения зоны повышенной разнокомпонентности в боках, уменьшения зоны неупругих деформаций в почве выработки.

Полученные результаты дают основание для утверждения: анкерная крепь может быть использована как технологическое средство снижения метанообильности горных выработок.

Выполнено численное моделирование связанных гео- и газодинамических процессов в окрестности выработки при буровзрывном способе её проведения и при протекании газодинамических явлений. Впервые установлены закономерности изменения геомеханических и фильтрационных параметров во время и после взрывания шпуровых зарядов, на фронте разрушения при газодинамических явлениях в зависимости от горно-геологических условий и технологических параметров проведения выработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод конечных элементов в задачах газонефтепромысловой механики / В.Н. Аликин, И.Е. Литвин, С.М. Щербаков, В.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
2. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
3. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
4. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.
5. Круковская, В.В. Разработка метода расчета параметров процесса фильтрации метана с учетом напряженно-деформированного состояния подрабатываемого угленосного массива: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 : защищена 3.11.06 : утв. 14.12.06 / Круковская Виктория Викторовна. – Днепропетровск, 2006. – 134 с.
6. Маскет, М. Физические основы технологии добычи нефти / М. Маскет. – Москва-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2003. – 606 с.
7. Боровиков, В.А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990. – 231 с.
8. Круковский, А.П. Технология опорно-анкерного крепления горных выработок угольных шахт Украины / А.П. Круковский, В.А. Хворостян, В.В. Круковская // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 13-16.
9. Николин, В.И. Борьба с выбросами угля и газа в шахтах / В.И. Николин, И.И. Балинченко, А.А. Симонов. – М.: Недра, 1981. – 300 с.
10. Бодня, Г.В. Особенности тектонических зон, опасных по внезапным выбросам угля и газа /

Г.В. Бодня // Вопросы вентиляции и борьбы с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах: науч. сообщ. / Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М., 1977. – С. 88-92.

11. Трифонова, Н.В. О закономерностях изменения газодинамических параметров зоны разрушения в процессе выброса / Н.В. Трифонова // Выбросы угля, породы и газа. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 60-64.

12. Шевелев, Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. – К.: Наук. думка, 1989. – 160 с.

13. Формирование выбросоопасных зон в углепородном массиве и способы предотвращения выбросоопасности на шахтах / А.И. Жаров, Н.Н. Красюк, А.В. Ремезов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. – 92 с.

14. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: Стандарт Мінвуглепрому України. СОУ 10.1.00174088.011-2005. – К.: Мінвуглепром України, 2005. – 226 с.

15. Численное моделирование гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты / А.Ф. Булат, В.В. Круковская, А.П. Круковский, В.В. Зберовский // Геотехническая механика: Сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – № 105. – С. 14-25.

## REFERENCES

1. Alikin, V.N., Litvin, I.Ye., Shcherbakov, S.M. and Borodavkin, V.P. (1992), *Metod konechnykh elementov v zadachakh gazoneftepromyslovoiy mekhaniki* [The finite element method in problems of gas-oilfield mechanics], Nedra, Moscow, Russia.

2. Zenkevich, O. (1975), *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in technics], Mir, Moscow, USSR.

3. Segerlind, L. (1979), *Primeneniye metoda konechnykh elementov* [Application of Finite Element Method], Mir, Moscow, USSR.

4. Aziz, Kh. and Settari, E. (2004), *Matematicheskoye modelirovaniye plastovykh sistem* [Mathematical modeling of stratal systems], Institut komp'yuternykh issledovaniy, Moscow-Izhevsk, Russia.

5. Krukovskaya, V.V. (2006), "Development of the method of calculation of parameters of the filtering process of methane considering stress-strain state of undermined rock mass", Ph.D. Thesis, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

6. Masket, M. (2003), *Fizicheskiye osnovy tekhnologii dobychi nefi* [Physical basis of technology of oil production], Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, Moscow-Izhevsk, Russia.

7. Borovikov, V.A. and Vanyagin, I.F. (1990), *Modelirovaniye deystviya vzryva pri razrushenii gornykh porod* [Simulation of explosion action in rock failure], Nedra, Moscow, USSR.

8. Krukovskiy, A.P., Khvorostyan, V.A. and Krukovskaya, V.V. (2013), "Technology of support-anchoring mining of coal mines in Ukraine", *Coal of Ukraine*, no. 2, pp. 13-16.

9. Nikolin, V.I., Balinchenko, I.I. and Simonov, A.A. (1981), *Bor'ba s vybrosami uglya i gaza v shakhtakh* [The fight against emissions of coal and gas in mines], Nedra, Moscow, USSR.

10. Bodnya, G.V. (1977), "Features of tectonic zones, prone to sudden outbursts of coal and gas", *Vo-prosy ventilyatsii i bor'by s gazom i vnezapnymi vybrosami v ugl'nykh shakhtakh: nauch. soobshch.*, pp. 88-92.

11. Trifonova, N.V. (1976), "On laws of change of gas-dynamic parameters in the process of fracture zone ejection", in Trifonova, N.V., *Vybrosy uglya, porody i gaza* [Emissions of coal, rock and gas], Naukova dumka, Kiev, USSR, pp. 60-64.

12. Shevelev, G.A. (1989), *Dinamika vybrosov uglya, porody i gaza* [The dynamics of emissions of coal, rock and gas], Naukova dumka, Kiev, USSR.

13. Zharov, A.I., Krasnyuk, N.N., Remezov, A.V. [et al.] (2006), *Formirovaniye vybrosopasnykh zon v ugleporodnom massive i sposoby predotvrashcheniya vybrosopasnosti na shakhtakh* [Formation of outburst zones in rock mass and ways of preventing outburst in mines], *Kuzbassvuzizdat*, Kemerovo, Russia.

14. Ukraine Ministry of Coal Industry (2005), 10.1.00174088.011-2005. *Pravyla vedennya hirnychykh robit na plastakh, skhyl'nykh do hazodynamichnykh yavlyshch: Standart Minvuhlepromu Ukrayiny* [Terms of mining in seams prone to gas-dynamic phenomena: Standard of Ministry of Coal Industry of Ukraine], Ministry of Coal Industry of Ukraine, Kiev, Ukraine.

15. Bulat, A.F., Krukovskaya, V.V., Krukovskyy, A.P. and Zberovskyy, V.V. (2012), "Numerical modeling of the hydroimpulse impact on outburst coal seams", *Geo-Technical Mechanics*, no. 105, pp. 14-25.

### Об авторе

*Круковская Виктория Викторовна*, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net)

### About the author

*Krukovskaya Victoriya Victorovna*, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net)

**Анотація.** В роботі досліджується взаємозв'язок деформаційних, дифузійно-фільтраційних та інших фізичних процесів, що відбуваються у вуглепородному масиві при різних технологічних діях.

Запропоновано комплекс математичних моделей та розрахункових методів, що дозволяють об'єднати в зв'язану систему декілька фізичних процесів, які відбуваються у вуглепородному масиві при різних технологічних діях, та моделювати складні процеси геомеханіки. Встановлено критерій оцінки ступеню впливу кожного із зв'язаних процесів на зміну масивів спільних параметрів для визначення необхідності їх урахування у відповідних математичних моделях. Показано, що знехтування деякими процесами при математичному моделюванні складних фізичних процесів призводить до похибок, які доходять до 250 %.

Розроблено математичні моделі і методи розрахунку параметрів зв'язаних процесів «деформування масиву з анкерним кріпленням – фільтрація метану», «деформування масиву з анкерним кріпленням – фільтрація метану – дія вибуху», «зміна напруженого стану масиву у вибої виробки – фільтрація метану – десорбція метану» при газодинамічних процесах, «зміна напруженого стану масиву у вибої виробки – двофазна фільтрація рідини та газу» при нагнітанні рідини у вугільний пласт. На основі розроблених моделей встановлено просторово-часові закономірності зміни параметрів зазначених зв'язаних процесів.

**Ключові слова:** зв'язані процеси, напружено-деформований стан вуглепородного масиву, фільтрація флюїдів, газодинамічні явища, анкерне кріплення, дія вибуху.

**Abstract.** Interrelation between deformation, diffusion-filtration and other physical processes in the coal-rock massif occurred under various technological influences is analyzed in this paper.

A set of mathematical models and computational methods are proposed which make possible to combine into one coupled system several physical processes occurred in the rock mass under various technological impacts, and to simulate complex geomechanical processes. A criterion is proposed for evaluating degree of each of the coupled processes influence on the common parameters changing and for determining whether it is necessary to take them into account in corresponding mathematical models. It is shown that neglecting some of the processes in the mathematical modeling of complex physical processes leads to errors reaching 250 %.

Mathematical models of and methods of parameters computing were designed for the following coupled processes: «deformation of the rock massif with roof bolting – methane filtration», «deformation of the rock massif with roof bolting – methane filtration – action of an explosion», «change in the stressed state of the working face – methane filtration – methane desorption» during the gas-dynamic processes, «change in the stressed state of the working face – two-phase filtration of fluid and gas» during fluid injection into the coal seam. On the basis of these models the space-time patterns of coupled processes parameters changing were established.

**Keywords:** coupled processes, stress-strain state of the coal-rock massif, fluids filtration, gas-dynamic phenomena, roof bolting, action of an explosion.

*Стаття поступила в редакцію 02.04.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко*