

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.67.79.002

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2022

**Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ**

д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник  
ФИЦ УХХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: nvch2014@yandex.ru



## ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСКРЫТИИ МЕТАНОМ КЛИВАЖНЫХ ТРЕЩИН В КРАЕВОЙ ЗОНЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

*Поставлена и решена задача о влиянии метана в процессе раскрытия трещин в краевой предельно напряжённой зоне угольного пласта. Идея состоит в использовании результатов решения задачи о построении поля напряжений в предельно напряжённой зоне пласта методами механики сыпучих сред и задачи о распределении внутрипластового давления метана при движении забоя выработки на основе сорбционной изотермы пласта в оценке раскрываемости кливажных трещин угольного пласта. Отсутствие сцепления на кливажных трещинах упрощает формулирование условий их раскрытия, которые сводятся к одному — условию превышения порового давления метана над величиной нормальных к поверхности кливажных трещин напряжений. Выполнение этого условия приводит к образованию поверхностей, заполненных свободным метаном.*

*Данная задача напрямую связана с процессами выбросов в выработку угля и газа, которые могут проявляться либо в форме выдавливания свободным метаном приконтурной части пласта, либо в форме возникновения и распространения сначала волны дробления угля с последующим выбросом с большой скоростью образовавшейся после дробления смеси угля и газа.*

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ФИЛЬТРАЦИИ, ПРОНИЦАЕМОСТИ, ПОРИСТОСТИ.

**Введение.** При отработке угольных месторождений подземным способом в первую очередь следует учитывать, что наибольшую опасность представляют внезапные выбросы угля и газа, обусловленные рядом горно-геологических и горнотехнических факторов, среди которых важнейшими являются распределение поля напряжений и изменение давления метана в краевой зоне пласта [1–12].

Характер распределения поля напряжений в краевой зоне зависит от наличия в пласте нарушений, представленных, например, непрочными прослойками, часто называемых

«слабыми» или «перемятыми» пачками. Изменение же давления метана вглубь пласта зависит от целого ряда коэффициентов: пористости, фильтрации и проницаемости пласта, вязкости метана, а также от скорости подвигания очистного забоя.

Определение каждого из перечисленных факторов для оценки прогноза выброса с большой вероятностью является важной и актуальной задачей геомеханики. Кроме этого, важен одновременный учёт влияния наиболее значимых параметров среды, играющих существенную роль в окончательных резуль-

татах её решения. Т. е. необходимо оценить степень взаимного влияния горного давления и внутрипластового давления метана при их изменениях. Как показывают исследования, коэффициент проницаемости пласта, значительно влияющий на внутрипластовое давление метана, зависит от величины горного давления [13–15].

По-видимому, учёт взаимного влияния непрерывно меняющихся значений горного давления и внутрипластового давления метана вряд ли возможен, поскольку в этом случае получается эффект «замкнутого круга», когда при определении одного параметра необходимо располагать значением второго параметра, который в свою очередь выражается через первый параметр. В этой связи, следует принять допущение о том, что горное давление не зависит от давления метана, а полностью определяется физико-механическими характеристиками угольного пласта, глубиной его отработки, а также размерами выработки.

К настоящему времени разработаны различные подходы, описывающие ряд геодинимических явлений [1–3, 5, 9, 10, 16–18], в том числе и внезапных выбросов. Все они едины в том, что для описания и прогноза этих явлений важнейшую роль играет распределение горного давления (поля напряжений) в краевых зонах угольного пласта, которое не зависит от газосодержания пласта.

Напряжённое состояние в окрестности горных выработок, оцениваемое теоретическими методами [2, 5, 10, 19–22], представляется эпюрами напряжений, действующими на пласт, которые задаются аналитическими функциями, чаще всего экспонентами. Эти методы практически не учитывают два важнейших фактора, влияющие на газодинамические процессы. Во-первых, они лишь приближённо учитывают наличие в пласте нарушения в виде «слабой» прослойки и, во-вторых, никак не учитывают различие в характеристиках прочности самого пласта и на его контакте с окружающим массивом, а эти факторы как раз и оказывают существенное влияние на распределение поля напряжений в краевой зоне пласта.

При описании процессов внезапных выбросов в настоящее время ряд авторов считает, что процесс выброса угля и газа осуществляется в два этапа [2, 16–18]. На первом этапе происходит интенсивное развитие поровых трещин под действием горного давления и давления свободного метана, находящегося в этих трещинах, а на втором этапе высвободившийся в результате образования системы магистральных трещин метан, выдавливает перегородку (пробку) между забоем выработки и областью скопившегося метана.

В данной статье поле напряжений в углепородном массиве определяется на основе разработанной модели геомеханического состояния массива горных пород с прочностной анизотропией, вмещающего угольный пласт с непрочным прослойком и пройденную по нему горную выработку [23–26]. Она построена на фундаментальных методах механики деформируемого твёрдого тела и сыпучих сред. В ней характеристики прочности угольного пласта меньше, чем в породах вмещающего массива, но выше характеристик прочности прослойки, а также характеристик прочности на его контакте с окружающим массивом [5]. Распределение внутрипластового (порового) метана вглубь пласта определяется по сорбционной изотерме и на основе подхода, разработанного акад. С.А. Христиановичем [12]. Сформулировано условие раскрытия трещин (образования свободных поверхностей) в краевой зоне пласта.

Целью статьи является определение приконтурной зоны пласта, в которой при определённом сочетании давления метана и опорного давления в пласте возникают свободные поверхности, являющиеся необходимым условием возникновения газодинамического явления.

**Постановка и решение задачи о напряжённом состоянии углепородного массива, вмещающего угольный пласт и очистную выработку.** Задача о напряжённом состоянии пласта и образовании свободных поверхностей при наличии в нём кливажа и внутрипластового метана представляется в следующей постановке (рис. 1). На глубине  $H$  в массиве

горных пород, моделируемом невесомой плоскостью, имеется очистная выработка 1 с механизированной крепью 2. Высота выработки  $h$ , пролёт  $a$ . Она отработывает угольный пласт 3 на всю его мощность. Пласт имеет регулярную систему кливажных трещин 4, наклонённых к вертикали под углом  $\alpha$ . Плоскость нагружена сверху, снизу и с боков равнокомпонентным гравитационным давлением  $\gamma H$  ( $\gamma$  — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород). Характеристики прочности пласта:  $\sigma_0$  — предел прочности на одноосное сжатие,  $K$  — коэффициент сцепления,  $\delta$  — угол внутреннего трения меньше, чем характеристики прочности пород вмещающего массива, но больше, чем характеристики ( $K'$  — коэффициент сцепления,  $\delta'$  — угол внутреннего трения) по кливажным трещинам и контактам пласта с остальным массивом. В средней части пласта имеется слой (прослойка, пачка) «слабого» низко прочного угля 5 мощностью  $h_s$ . Предел прочности слоя  $\sigma_{0s}$  меньше, чем  $\sigma_0$ , а угол внутреннего трения  $\delta_s$  близок к значению  $\delta$ . В краевой части пласта между точками A и C образуется зона неупругого деформирования пласта шириной  $L = L_s + L_p$  ( $L_s$  — ширина зоны прослойка,  $L_p$  — ширина зоны пласта). За этой зоной правее точки C

находится область упругого деформирования пласта;  $L_v$  — размер приконтурной части пласта, в пределах которого образуются свободные поверхности, заполненные метаном под давлением  $p$ . Система координат  $yOz$  совпадает с центральными осями выработки. В окрестности очистной выработки образуется слой обрушенных пород 6. Этот слой, существенно влияющий на распределение поля напряжений в углепородном массиве, необходимо учитывать при построении модели геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего очистную выработку. В данной задаче обрушенные породы считаются сыпучей средой, причём, часть слоя правее точки D размером  $L_c$  находятся в предельно напряжённой зоне, а другая часть, расположенная левее точки D, деформируется упруго.  $\Psi$  — угол сдвига горных пород в зоне ведения очистных работ принят равным  $50^\circ$  [5]. Углы внутреннего трения слоя обрушенных пород и на их контакте с окружающим массивом приняты одинаковыми и равными  $25^\circ$ , а коэффициент разрыхления составляет 1,2 единицы [5]. Высота этого слоя  $h_o$  определяется из соображения полного подбучивания налегающих на него пород [5].

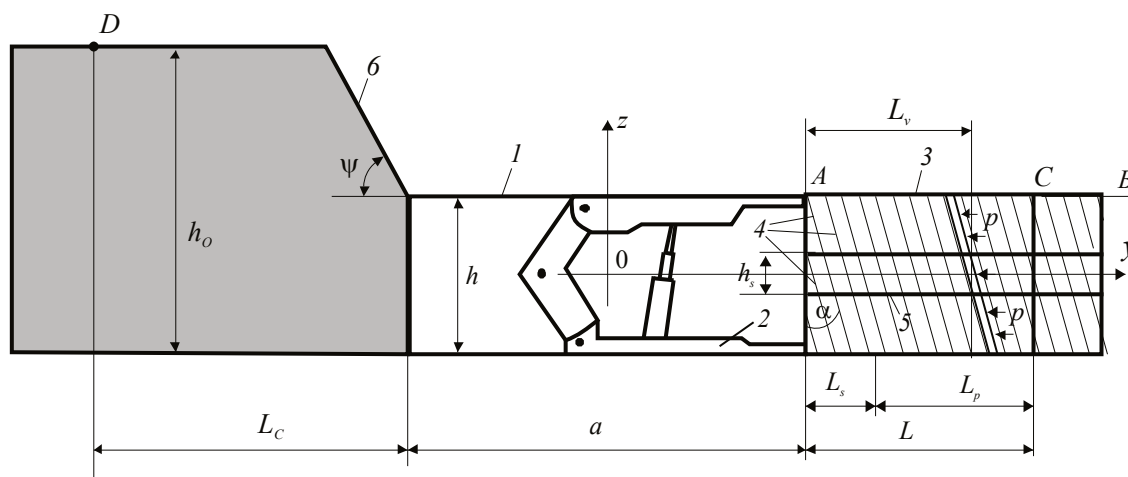


Рис. 1. Расчётная схема задачи

Механизм формирования предельно напряжённых зон с образованием линий скольжения изложен в работах [5, 23–26]. В них показано, что предельно напряжённые зоны структурно однородного пласта развиваются вглубь, начиная с его обнажения (от его кром-

ки), когда вертикальные главные напряжения  $\sigma_1$  (главное напряжение  $\sigma_3$  на обнажении равно нулю) достигают значения  $\sigma_0$ . При слабом контакте пласта с массивом, в предельно напряжённой зоне вдоль контакта пласта с массивом происходит проскальзывание пла-

ста. В этой связи в одновременно реализуются два предельных состояния равновесия: общее или обыкновенное и специальное, соответствующие критериям Кулона – Мора для прямолинейных огибающих кругов предельных состояний по пласту и по поверхностям ослабления [5, 24, 26].

Очевидно, что при наличии в угольном пласте «слабого» прослойка предельное состояние, которое сопровождается появлением линий скольжения, наступает сначала в нём, а в пласте оно возникает лишь на некотором удалении от его кромки и при достижении приведённым напряжением в прослойке величины приведённого напряжения в пласте, которое соответствует предельному состоянию одноосного сжатия. Далее пласт и прослойка деформируются как единое целое, при этом линии скольжения в прослойке и в пласте едины и не испытывают разрывов. Характер распределения эпюр напряжений вдоль контактов прослойка, пласта и массива, а также вдоль оси пласта сохраняет вид попеременно сменяющихся постоянных и нелинейных участков [24, 27, 28], которые в дальнейшем при решении краевой задачи теории упругости аппроксимируются полиномами различной степени, которая определяется протяжённостью предельно напряжённой зоны.

Следует отметить, что наличие кливажа не изменяет характер распределения линий скольжения в краевой части пласта, но предельно напряжённое состояние реализуется также и по кливажным трещинам.

Размер предельно напряжённой зоны и пласта и слоя обрушенных пород ограничен и на определённом расстоянии от кромок пласта и слоя обрушения они деформируются упруго. Граница смены пластических и упругих деформаций определяется из решения упругопластической задачи, которая путём замены предельно напряжённых зон пласта и слоя обрушенных пород реактивными усилиями, действующими на границах этих зон, сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости [23, 25] и решается методом граничных интегральных уравнений [29].

На рис. 2 по результатам решения упруго-пластической задачи построены эпюры нормальных напряжений (кривые 1, 2) вдоль кровли пласта (линия ACB на рис. 1). В качестве исходной информации при проведении вычислительного эксперимента приняты следующие параметры:  $H = 600$  м,  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup>,  $\sigma_0 = 10$  МПа,  $\delta = 20^\circ$ ,  $\sigma_{0s} = 4,6$  МПа,  $\delta_s = 20^\circ$ ,  $\delta' = 10^\circ$ ,  $K' = 0$ ,  $a = 25$  м,  $h = 3$  м,  $h_s = 0,75$  м. Цифрой 1 на рис. 2 обозначена эпюра напряжений в предельно напряжённой зоне, а цифрой 2 — в его упругой области.

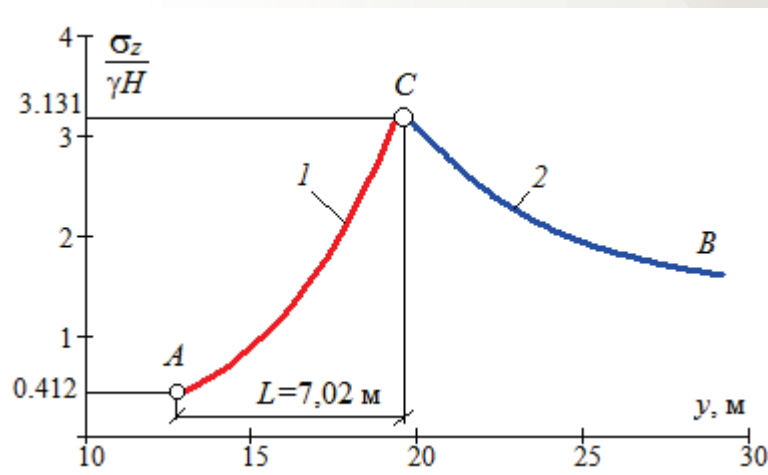


Рис. 2. Эпюра нормальных напряжений вдоль кровли пласта

На рисунке показано, что максимум опорного давления равен  $3,131 \gamma H$  (46,965 МПа), а ширина предельно напряжённой зоны состав-

ляет 7,02 м. Как показывают расчёты, пласт переходит в предельное состояние на расстоянии 1,25 м от его кромки (забоя выработки).

Представленная эпюра опорного давления полностью определяет напряжённое состояние в окрестности ведения очистных работ и обеспечивает проведение исследований по прогнозным оценкам газодинамических явлений.

**Постановка и решение задачи о распределении порового давления метана.** При построении кривой распределения давления метана вглубь пласта использованы подходы, изложенные акад. С.А. Христиановичем в работах [12]. Кроме этого, в данной статье обозначения физических величин и параметров, входящих в формулы, графики, связанные с динамическими явлениями, в основном совпадают с обозначениями и в других его работах, посвящённых описаниям механизма формирования сначала волны дробления угля, а затем и волны выброса смеси газа и раздробленного угля [30, 31].

Так как фильтрующая способность угля невелика, то при движении забоя пластовой выработки происходит падение давления в приконтурном слое угля небольшой толщины, которая зависит от скорости движения забоя, фильтрационных свойств угля, а также от физических свойств (вязкости) метана.

Полагается, что газовыделение из движущегося с постоянной скоростью  $\theta$  забоя и давление метана  $p$  вблизи забоя по отношению к движущемуся забою остаются постоянными. При этом используются одномерные уравне-

ния фильтрации метана с учётом явления его десорбции. В этой связи вычисление удобно производить для единицы площади поверхности. Полагается также, что процесс выделения метана из забоя протекает изотермически и, следовательно, справедливо соотношение:

$$\frac{\rho}{\rho_*} = \frac{p}{p_*}, \quad (1)$$

где  $\rho_*$ ,  $p_*$  — начальные значения плотности и давления газа,  $\rho$ ,  $p$  — его текущие плотность и давление.

Плотность угля  $\rho_y$  можно представить в виде:

$$\rho_y = \rho_{y*} - \rho_* b,$$

где  $\rho_{y*}$  — начальная плотность угля,  $\rho_*$  — начальная плотность газа, коэффициент  $b$  определяется по изотермам сорбции по формуле [12]:

$$b = 1,3 \frac{T_*}{273} \frac{p_{aT}}{p_*} (q_* - q), \quad (2)$$

где  $T_*$  — начальная температура газа,  $p_{aT}$  — атмосферное давление,  $q_*$  — сорбция ( $\text{м}^3/\text{т}$ ) при давлении  $p = p_*$ ,  $q$  — сорбция при давлении, равном  $p$ . Сорбционная изотерма приведена на рис. 3. Она построена на основе усреднённой информации по пластам на угледобывающих предприятиях Кузбасса.

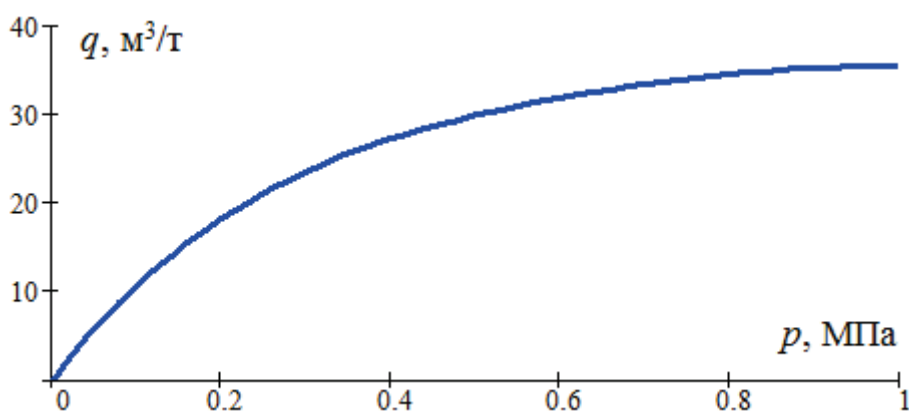


Рис. 3. Сорбционная изотерма пласта

Очевидно, что количество газа в угольном пласте между двумя его поперечными сечени-

ями в момент времени  $t + dt$  равно количеству газа между теми же сечениями в момент вре-

мени  $t$ , поэтому количество газа, выделившегося между этими сечения за время  $dt$ , определится следующим соотношением:

$$(\rho_{y^*} - \rho_y) \cdot \theta = \rho_* b \cdot \theta. \quad (3)$$

Изменение количества газа между этими же сечениями за единицу времени на единицу площади поперечного сечения плюс количество газа, прошедшего через сечение около свободной поверхности, равно

$$m\theta\rho - m\theta\rho_* + u\rho, \quad (4)$$

где  $m$  — коэффициент пористости угольного пласта,  $u$  — скорость фильтрации газа.

На рис. 4 построена зависимость коэффициента  $b$ , входящего в формулу (2), от давления  $p$  метана. Значение  $p_*$  принято равным 6 МПа (равно гидростатическому давлению на глубине 600 м). Из рисунка следует, что график зависимости имеет вид вогнутой кривой.

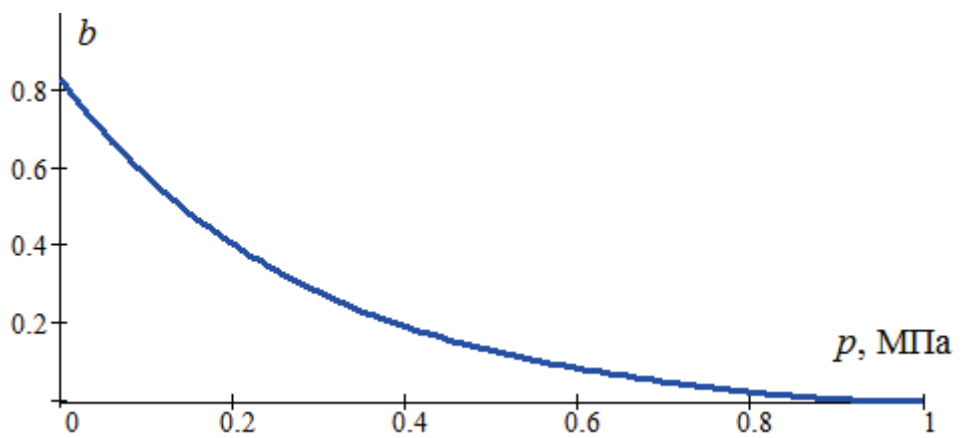


Рис. 4. График зависимости параметра  $b$  от давления метана  $p$

Очевидно, что на основании закона сохранения массы количество газа, определяемого выражениями (3) и (4), одинаково, поэтому

$$(\rho_* - \rho)m\theta - u\rho = \rho_* b \cdot \theta,$$

Откуда скорость фильтрации определяется следующей зависимостью:

$$u = -\theta m \frac{\rho_*}{\rho} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_*} + \frac{b}{m} \right). \quad (5)$$

При изотермическом течении газа справедливо условие (1) и, кроме того, выполняется закон фильтрации Дарси в следующей форме

$$u = -\frac{K}{\mu} p_* \frac{d\beta}{dy}. \quad (6)$$

В выражении (6)  $\mu$  является коэффициентом динамической вязкости, параметр  $K$  — коэффициент проницаемости пласта, а коэффициент  $\beta = p/p_*$ .

В общем случае коэффициент проницаемости пласта зависит от параметров опорного давления, меняющихся вглубь пласта, и представляется зависимостью:

$$K = K_* l(y),$$

где  $K_*$  — коэффициент проницаемости пласта на достаточном удалении от его кромки, а  $l(y)$  — параметр, определяющий характер распределения коэффициента проницаемости по глубине пласта (вдоль оси  $y$ ).

После подстановки выражения (5) в дифференциальное уравнение (6) и разделения переменных оно приводится к следующему соотношению между переменными:

$$\frac{1}{y_*} \int_0^y \frac{dy}{l(y)} = \int_{\beta_0}^{\beta} \frac{\beta d\beta}{1 - \beta + \frac{b}{m}}, \quad (7)$$

в котором величина  $y_*$  обозначена через основные исходные данные:

$$\frac{1}{y_*} = \frac{m\theta\mu}{K_*p_*},$$

а  $\beta_0$  соответствует давлению газа  $p_0$  на свободной поверхности.

Задача определения коэффициента проницаемости углей является непростой задачей, поскольку этот коэффициент зависит от многих условий, в частности, он сильно зависит от структуры пласта и от распределения горного давления. В настоящее время в полной мере эта задача не решена [17–19]. По-видимому, в справочной литературе приводятся данные о коэффициенте проницаемости, полученные либо в лабораторных условиях, либо непосредственно в краевой части пласта. В этой связи в статье коэффициент проницаемости на кромке пласта принят по среднестатистическим справочным данным. Поскольку данных о зависимости коэффициента проницаемости от параметров горного давления нет, то здесь принимается допущение о том, что в сечении пласта с максимумом опорного давления он на два порядка меньше, чем на его кромке. Изменение параметра  $l(y)$ , характеризующего изменение этого коэффициента вглубь пласта, происходит по закону показательной функции

$$l(y) = \left( \frac{K_0}{K_*} \right)^{1-y/L_K}, \quad (8)$$

где  $K_0$  — коэффициент проницаемости пласта на его кромке,  $L_K$  — расстояние от кромки пласта, при котором коэффициент проницаемости принимает значение, близкое к  $K_*$ .

Такой подход к подбору значений коэффициента проницаемости не вносит принципиальных изменений в разработанную модель, но позволяет использовать и другие варианты в распределении коэффициента проницаемости по глубине пласта.

После подстановки (8) в левую часть (7) интеграл берётся в замкнутом виде:

$$\frac{1}{y_0} \int_0^y \frac{dy}{\omega^{1-y/L_K}} = \frac{L_K}{y_0 \cdot \ln \omega} \left( \frac{1}{\omega^{1-y/L_K}} - \frac{1}{\omega} \right), \quad (9)$$

где  $\omega = K_0/K_*$ .

Интеграл в правой части уравнения (7) также берётся в замкнутом виде при условии, если параметр  $b$  линейно зависит от  $\beta$  [12]:

$$J(\beta) = \int_{\beta_0}^{\beta} \frac{\beta d\beta}{1-\beta + \frac{b}{m}} = Z(\beta) - Z(\beta_0), \quad (10)$$

где

$$Z(\beta) = -[\beta + \ln(1-\beta)].$$

В дальнейшем при получении картины распределения давления метана в пласте интеграл  $J(\beta)$  в (10) определяется численно. В этом случае уравнение (8) с учётом (9) и (10) принимает следующий вид:

$$\frac{L_K}{y_0 \cdot \ln \omega} \left( \frac{1}{\omega^{1-y/L_K}} - \frac{1}{\omega} \right) = J(\beta). \quad (11)$$

Из уравнения (11) после некоторых преобразований легко получить зависимость между абсциссой  $y$  и параметром давления газа  $\beta$  в следующем виде:

$$y = L_K \left\{ 1 - \frac{1}{\ln \omega} \cdot \ln \left[ \frac{\omega \cdot L_K}{L_K + \omega \cdot J(\beta) \cdot y_0 \cdot \ln \omega} \right] \right\}. \quad (12)$$

Ниже представлены графические результаты, полученные по приведённым формулам при следующих исходных данных:  $\theta = 20$  м/сутки,  $m = 0,15$ ;  $K_* = 0,01$  миллидарси,  $K_0 = 1,5$  миллидарси,  $\mu = 0,011$  сП =  $1,1 \cdot 10^{-11}$  МПа·с;  $p_{0aT} = 0,1$  МПа,  $T_* = 20$  С.

На рис. 5 построен график, соответствующий зависимости (12), который наглядно представляет картину распределения внутрипластового давления метана вдоль абсциссы, направленного вглубь пласта. Из него следует, что из принятых исходных данных давление метана достигает значения 4,0 МПа на расстоянии около 1,8 м от кромки пласта.

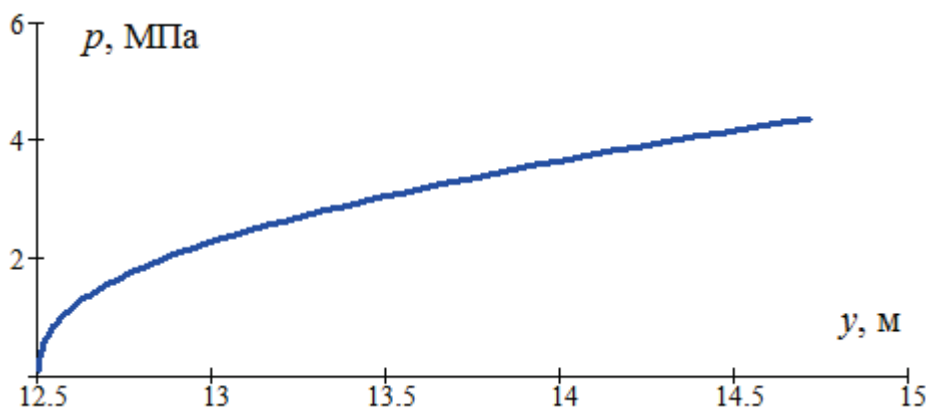


Рис. 5. График распределение порового метана вдоль оси пласта

Особенностью и линий скольжения, и кливажных трещин является отсутствие на них сцепления, т. е. коэффициент сцепления на них равен нулю. В этой связи условием образования свободных поверхностей на этих трещинах является следующее условие [32]:

$$p \geq \sigma_n, \quad (13)$$

где  $p$  — давление метана,  $\sigma_n$  — нормальное к поверхности трещины напряжение в пласте.

В данной работе представлены только результаты решения задачи о раскрытии кливажных трещин (раскрытие линий скольжения не рассматривается). В этом случае нормальное к направлению кливажа напряжение  $\sigma_n$  определяется по известной формуле теории напряжённого состояния в точке [29]:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \cos^2 \alpha, \quad (14)$$

где  $\alpha$ , как указано выше, — угол наклона к вертикали кливажных трещин.

На рис. 6 и 7 показаны эпюры нормальных напряжений  $\sigma_n$  (линия 1) и порового давления метана (линия 2), построенные вдоль оси пласта при  $\alpha = 10^\circ$  и  $\alpha = 20^\circ$ , соответственно.

Из рис. 6 следует, что на участке графиков между точками  $R$  и  $F$  кривая давления пластового метана расположена выше эпюры нормальных напряжений  $\sigma_n$  и, следовательно, линии скольжения в промежутке между этими точками раскрыты. В точке  $R$ , в которой пересекаются эпюры  $\sigma_n$  и  $p$ , давление газа составляет 0,19 МПа, а её абсцисса 12,52 м. В другой точке  $F$  давление составляет 3,58 МПа, а расстояние между кромкой пласта и этой точкой, которое соответствует предельной длине  $L_p$ , равно 1,41 м (13,91–12,5). Это значение больше расстояния 1,25 м, при котором пласт переходит в предельное состояние. Следовательно, точка  $F$  принадлежит самому пласту, и область раскрытия кливажных трещин захватывает не только слабый прослой, но и сам пласт.



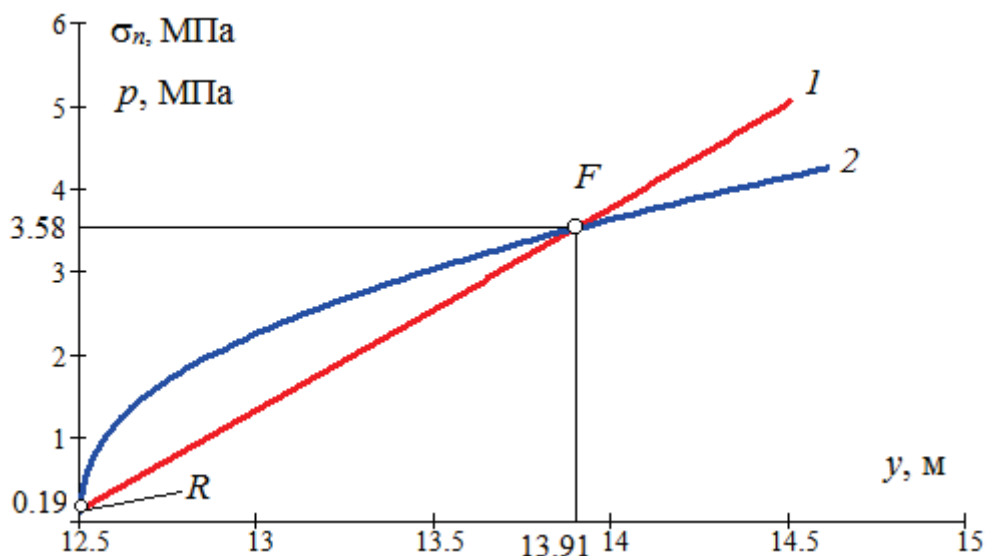


Рис. 6. Эпюры распределения нормального к линии скольжения напряжения (кривая 1) и порового давления метана (кривая 2) вдоль оси пласта,  $\alpha = 10^\circ$

На рис. 7 кривая порового метана расположена ниже эпюры нормальных напряжений  $\sigma_n$ , и поэтому раскрытия кливажных трещин,

а, следовательно, и образования свободных поверхностей не происходит.

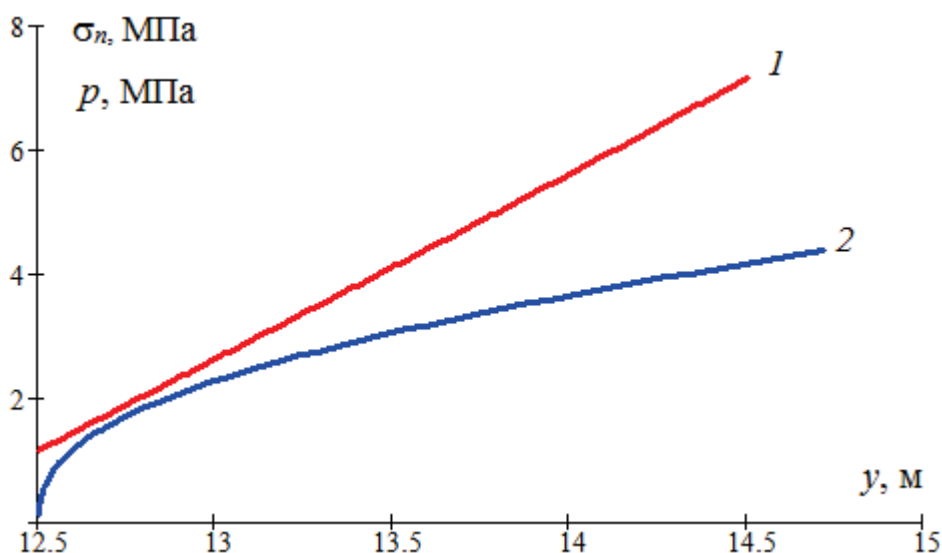


Рис. 7. Эпюры распределения нормального к линии скольжения напряжения (кривая 1) и порового давления метана (кривая 2) вдоль оси пласта,  $\alpha = 30^\circ$

Таким образом, наклон кливажных трещин играет важную роль в раскрытии их внутрипластовым метаном.

**Заключение.**

1. В основе разработанной модели выброса угля и газа лежат концептуальные идеи акад. С.А. Христиановича о газодинамических процессах в угольном пласте, а также модель геомеханического состояния углепородного анизотропного по прочности мас-

сива в окрестности выработки, пройденной по пласту с низкопрочным прослойком. В разработанной модели увязаны в единое целое вопросы напряжённого состояния краевой предельно напряжённой зоны угольного пласта с вопросами состояния порового метана. Сформулированы условия образования свободных (суфлярных) поверхностей, на которых скапливается свободный метан, являющийся одним из основных инициаторов

возникновения динамических явлений.

2. В рассмотренных примерах исходные данные приняты таким образом, чтобы было возможно образование поверхностей, заполненных свободным метаном. В особенности это касается коэффициентов пористости и проницаемости угольного пласта, а также скорости движения очистного забоя, так как они в большей степени влияют на распределение порового метана вдоль пласта. Значение коэффициента пористости принято равным 0,15 единицы. Оно является промежуточной величиной между крайними значениями 0,05–0,2, приведёнными в справочной литературе. Скорость очистного забоя принята достаточно высокой, равной 20 м в сутки, что, скорее всего, превышает реальную среднестатистическую скорость. Коэффициент проницаемости изменяется по закону показательной функции, на забое выработки он принят равным 1,5 миллидарси, а в сечении с максимумом опорного давления коэффициент проницаемости минимален и равен 0,01 миллидарси, т. е. на два порядка меньше, чем на кромке пласта.

Скорость движения очистного забоя и коэффициент пористости относятся к параметрам, которые установить не сложно. Для определения коэффициента проницаемости требуется более тщательная подготовка и проведение эксперимента, так как этот параметр зависит как от структуры угольного пласта, так и от распределения горного давления, действующего на пласт.

Скорость движения очистного забоя и коэффициент пористости относятся к параметрам, которые установить не сложно. Для определения коэффициента проницаемости требуется более тщательная подготовка и проведение эксперимента, так как этот параметр зависит как от структуры угольного пласта, так и от распределения горного давления, действующего на пласт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. М., 1961. 363 с.
2. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М., 1983. 280 с.
3. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М., 1979. 296 с.
4. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М., 1980. 360 с.
5. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М., 1976. 272 с.
6. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М., 1954. 384 с.
7. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В. и др. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск, 2011. 524 с.
8. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л., 1989. 488 с.
9. Зыков В.С. Техногенная геодинамика. Учебное пособие. Кемерово, КузГТУ, 2006. 266 с.
10. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. М., 1976. 223 с.
11. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогемеханических процессов на выемочном участке шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 2. С. 28–35.
12. Христианович С.А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля. Изв. АН СССР. ОНТ. 1953. № 12. С. 1673–1678.
13. Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений // ФТПРПИ. 2016. № 2. С. 16–25.
14. Пучков Л.А., Сластунов С. В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов. М., 2002. 384 с.
15. Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы её определения. М., 1978. 122 с.
16. Зыков В.С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5. С. 44–48.
17. Shadrin A., Diyuk Y. Geophysical criterion of pre-outburst coal out squeezing from the face space into the working // International Journal of Mining Science and Technology, 2019. Vol. 29. Issue 3. P. 499–506.

18. Зыков В.С., Филатов Ю.М. Проявление опасности по газодинамическим явлениям в очистных забоях угольных шахт // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 441–445.
19. Черданцев Н.В., Преслер В.Т. Моделирование геомеханического состояния анизотропного по прочности неоднородного массива горных пород // Вестник КузГТУ. 2011. № 3. С. 15–22.
20. Черданцев Н.В., Федорин В.А. Геомеханическое состояние массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности комплекса протяжённых горизонтальных выработок // Вестник КузГТУ. 2006. № 1. С. 17–19.
21. Черданцев Н.В., Шаламанов В.А. Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений // Известия вузов «Горный журнал». 2004. № 5. С. 50–54.
22. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М., 1984. 382 с.
23. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Анализ состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 2018. № 2. С. 110–121.
24. Черданцев Н.В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 7–13.
25. Черданцев Н.В. Один из подходов к построению траектории трещины гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горной выработки // Прикладная математика и механика. 2020. Т. 84. № 2. С. 208–233.
26. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М., 1990. 272 с.
27. Черданцев Н.В. Оценка геомеханического состояния краевой зоны угольного пласта, вмещающего непрочный прослой // Прикладная математика и механика. 2021. Т. 85. № 2. С. 239–256.
28. Черданцев Н.В. Параметры опорного давления в краевой зоне пласта с низкопрочным прослойком, обрабатываемого очистной выработкой // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. № 3. С. 5–13.
29. Лурье А.И. Теория упругости. М., 1970. 940 с.
30. Христианович С.А. О волне дробления // Изв. АН СССР. ОНТ, 1953. № 12. С. 1689–1699.
31. Христианович С.А. О волне выброса // Изв. АН СССР. ОНТ, 1953. № 12. С. 1679–1688.
32. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М., 1984. 560 с.

---

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.67.79.002

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2022

**N.V. CHERDANTSEV**

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

#### SETTING AND SOLUTION OF TASK ON DISCLOSURE OF IMPORTANT CRACKS BY METHANE IN MARGINAL ZONE OF COAL BED

*The task on the influence of methane in the process of crack opening in the marginal extremely*

stressed zone of the coal seam was set and solved. The idea is to use the results of the solution of the problem on the construction of a stress field in the extremely stressed zone of the formation by methods of mechanics of bulk media and the problem on the distribution of the intrastatal pressure of methane during the movement of the bottom face of the mine based on the sorption isotherm of the formation in assessing the opening of wedge cracks of the coal formation. The absence of adhesion on wedge cracks simplifies the formulation of their opening conditions, which are reduced to one — the condition of excess of pore methane over the value of stress normal to the surface of wedge cracks. This condition results in surfaces filled with free methane.

This task is directly related to the processes of emissions into the production of coal and gas, which can manifest themselves either in the form of extrusion of the contour part of the board with free methane, or in the form of the occurrence and propagation of the coal crushing wave first, followed by emission at a high speed of the coal and gas mixture formed after crushing.

Keywords: ROCK MASS, COAL BED, MINING, EXTREMELY STRESSED ZONES, STRENGTH CHARACTERISTICS, EDGE PROBLEMS OF THEORY OF ELASTICITY AND LIMIT STATE, FILTRATION COEFFICIENTS, PERMEABILITY, POROSITY

#### REFERENCES

1. Khodot V.V. Sudden outbursts of coal and gas. M., 1961. 363 p. [In Russ.].
2. Petukhov I.M., Linkov A.M. Mechanics of rock bursts and outbursts. M., 1983. 280 p. [In Russ.].
3. Chernov O.I., Puzyrev V.N. Forecast of sudden outbursts of coal and gas. M., 1979. 296 p. [In Russ.].
4. Borisov A.A. Mechanics of rocks and massifs. M., 1980. 360 p. [In Russ.].
5. Fisenko G.L. Limit states of rocks around workings. M., 1976. 272 p. [In Russ.].
6. Ruppeneit K.V. Some questions of rock mechanics. M., 1954. 384 p. [In Russ.].
7. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V. Problems of safety and new technologies for underground mining of coal deposits. Novosibirsk, 2011. 524 p. [In Russ.].
8. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparyan E.V. Fundamentals of rock mechanics. L., 1989. 488 p. [In Russ.].
9. Zykov V.S. Sudden outbursts of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines. Kemerovo, 2010. 334 p. [In Russ.].
10. Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S., Feldman I.A. Theory of protective layers. M., 1976. 223 p. [In Russ.].
11. Kozyreva E.N., Shinkevich M.V. Features of gas geomechanical processes in the mining area of the mine // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Works in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2010. No. 2. P. 28–35. [In Russ.].
12. Khristianovich S.A. Distribution of gas pressure near a moving free surface of coal // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR [Izvestiya AN SSSR]. ONT. 1953. No. 12. P. 1673–1678. [In Russ.].
13. Zakharov V.N., Malinnikova O.N., Trofimov V.A., Filippov Yu.A. Dependence of coal seam permeability on gas content and acting stresses // FTSPRI [Physical and technical problems of mining]. 2016. No. 2. P. 16–25. [In Russ.].
14. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kolikov K.S. Extraction of methane from coal seams. M., 2002. 384 p. [In Russ.].
15. Kuznetsov S.V., Krigman R.N. Natural permeability of coal seams and methods for its determination. M., 1978. 122 p. [In Russ.].
16. Zykov V.S. On the mechanism of formation of an outburst hazardous situation in a coal mine working face // Mine Surveying Bulletin [Marksheyderskiy vestnik]. 2016. No. 5. P. 44–48. [In Russ.].
17. Shadrin A., Diyuk Y. Geophysical criterion of pre-outburst coal outskueezing from the face

space into the working // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Issue 3. P. 499–506.

18. Zykov V.S., Filatov Yu.M. Manifestation of danger in terms of gas-dynamic phenomena in coal mining faces // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyomkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2018. No. 4. P. 441–445. [In Russ.].

19. Cherdantsev N.V., Presler V.T. Modeling of the geomechanical state of an anisotropic strength inhomogeneous rock mass // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2011. No. 3. P. 15–22. [In Russ.].

20. Cherdantsev N.V., Fedorin V.A. Geomechanical state of a rock mass with weakening surfaces in the vicinity of a complex of extended horizontal workings // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 1. P. 17–19. [In Russ.].

21. Cherdantsev N.V., Shalamanov V.A. Boundary integral equations in the problems of the mechanics of underground structures // Proceedings of universities «Mining Journal» [Izvestiya vuzov «Gornyy zhurnal»]. 2004. No. 5. P. 50–54. [In Russ.].

22. Bulychev N.S. Mechanics of underground structures. M., 1984. 382 p. [In Russ.].

23. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Analysis of the state of the coal-rock mass containing the reservoir working and geological disturbance // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of a rigid body [Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela]. 2018. No. 2. P. 110–121. [In Russ.].

24. Cherdantsev N.V. Results of the numerical solution of the equations of the limiting state of the edge zone of the reservoir and their approximation by polynomials // Labor safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].

25. Cherdantsev N.V. One of the approaches to constructing the trajectory of a hydraulic fracture in a rock mass near a mine working // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2020. Vol. 84. No. 2. P. 208–233. [In Russ.].

26. Sokolovsky V.V. The statics of a granular medium. M., 1990. 272 p. [In Russ.].

27. Cherdantsev N.V. Assessment of the geomechanical state of the marginal zone of a coal seam enclosing a weak interlayer // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2021. Vol. 85. No. 2. P. 239–256. [In Russ.].

28. Cherdantsev N.V. Support pressure parameters in the marginal zone of a formation with a low-strength interlayer, worked out by a stope working // Bulletin of the Scientific Center of the VostNII for Industrial and Ecological Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2021. No. 3. P. 5–13. [In Russ.].

29. Lurie A.I. Theory of elasticity. M., 1970. 940 p. [In Russ.].

30. Khristianovich S.A. About the crushing wave // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR [Izvestiya AN SSSR]. ONT, 1953. No. 12. P. 1689–1699. [In Russ.].

31. Khristianovich S.A. О волне выброса // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR [Izvestiya AN SSSR]. ONT, 1953. No. 12. P. 1679–1688. [In Russ.].

32. Sedov L.I. Continuum mechanics. M., 1984. 560 p. [In Russ.].