

УДК 622.620.173/.174

**Булат А.Ф.**, академик НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,  
**Пилипенко Ю.Н.**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,  
**Новиков Л.А.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОЧИСТНЫМИ РАБОТАМИ ЗОН РАЗРЫВНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ**

**Булат А.Ф.**, академік НАН України, д-р техн. наук, професор,  
**Пилипенко Ю.М.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Новіков Л.А.**, магістр  
(ІГТМ НАН України)

## **ГЕОМЕХАНІЧНИЙ СТАН ФЛЮІДОНАСИЧЕНИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ ПРИ ПЕРЕХОДІ ОЧИСТНИМИ РОБОТАМИ ЗОН РОЗРИВНИХ ДИСЛОКАЦІЙ**

**Bulat A.F.**, Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,  
**Pilipenko Yu. N.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Novikov L.A.**, Master of Science  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **GEOMECHANICAL STATE OF FLUID SATURATION COAL SEAMS IN TRANSITION SEWAGE WORKS ZON RUPTURE DISLOCATIONS**

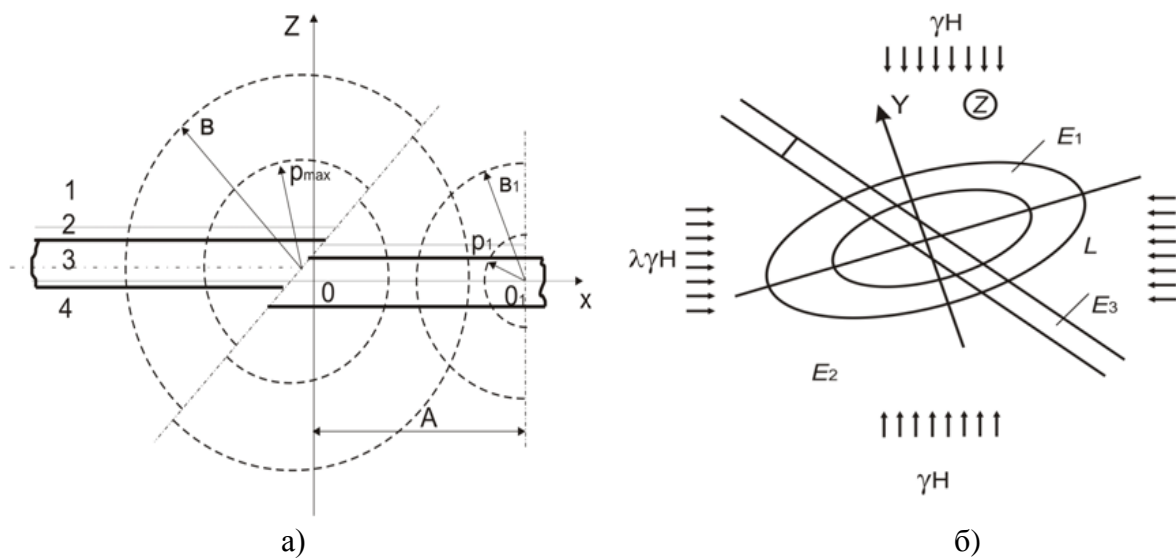
**Аннотация.** Представлено аналитическое описание напряженного состояния угольного пласта, включающего тектоническое нарушение с сомкнутыми берегами. Область нарушения представлена в виде эллиптического включения. Введение комплексной переменной в систему уравнений при подстановке значений текущих координат  $x$ ,  $y$  определяет поле напряжений в призабойной части угольного пласта в зоне влияния тектонического нарушения в пределах области, размеры которой могут существенно превышать зону дробления. Рассмотрено влияние физико-химического преобразования, с учетом роли флюидов в формировании деформаций на проявление напряженного состояния в области развития опережающих разрывов. Напряженное состояние определяется в виде суперпозиции двух решений об опорном давлении угольного пласта и зоны разрывной дислокации. Изменение параметров эллиптического включения и физико-механических свойств угольного пласта позволяет оценить напряженное состояние широкого класса разрывных структур.

**Ключевые слова:** тектоника, напряжения, разрывные структуры, флюид.

Большинство несчастных случаев на горных предприятиях связано с ухудшением горно-геологических условий добычи угля. Газодинамические явления, как правило, приурочены к зонам разрывных дислокаций. Прогноз выбросоопасности в очистных забоях затруднен, так как активное применение дегазации углепородного массива влияет на результаты текущего сейсмоакустического прогноза, по которому уже нельзя судить о потенциальной опасности ведения очистных работ [1].

Одним из важнейших направлений повышения безопасности горных работ в шахтах является создание эффективных способов и методов оценки свойств и геомеханического состояния угольных пластов в зонах разрывных дислокаций при их отработке мощными, энерговооруженными механизированными комплексами нового технического уровня 3, 4 поколения. Особенно актуальны эти исследования при отработке шахтных полей со сложной тектоникой, в виде «пассивных» и «активных» разрывных дислокаций, имеющих сложную морфологию и высокую газоносность угольных пластов. Цель работы - исследовать геомеханическое состояние флюидонасыщенных угольных пластов в зонах малоамплитудных нарушений. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: установить зависимости скорости фильтрационного течения вязкой жидкости и газа в трещинно-поровом коллекторе от пространственной ориентации элементов структуры угольных пластов; разработать теоретические предпосылки оценки напряженного состояния угольных пластов при подходе очистных работ к зоне тектонических нарушений.

Представление углепородного массива горизонтально-слоистой моделью, а разрывную дислокацию угольного пласта и зону дробления в виде эллипсоида вращения является достаточно хорошим приближением к реальным условиям [2, 3]. Такая модель удобна для расчетов и позволяет с помощью одних и тех же алгоритмов находить теоретические кривые для большого разнообразия многослойных разрезов (рис. 1 а, б).



1 – основная кровля пласта, 2 – непосредственная кровля, 3 – угольный пласт, 4 – почва угольного пласта, В – область влияния тектонического нарушения, В<sub>1</sub> – область влияния очистной выработки, P<sub>max</sub> – зона опорного давления нарушения, P<sub>1</sub> – зона опорного давления очистной выработки, А – расстояние от тектонического нарушения до очистного забоя

Рисунок 1 – Геомеханическая модель области разрывной дислокации (а) и угольного пласта

при моделировании их взаимовлияния под действием тектонических ( $\sigma$ ) напряжений

При изменении размеров полуосей  $a$ ,  $b$ , и  $c$  получаем два частных случая модели: в виде разрыва, имеющего форму эллипса, и в виде линейной трещины. Учтем, что эллипсоид вращения описывается уравнением:  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ . Если  $a = b > c$ , то имеем сплюснутый эллипсоид вращения вокруг малой оси эллипса  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ , лежащий в плоскости  $Oxz$ . При  $a = b < c$ , имеем вытянутый эллипсоид вращения, получившийся от вращения вокруг большой оси эллипса, лежащий в плоскости  $Oyz$ , а при  $a = b = c$ , имеем сферу. Для описания напряженного состояния угольного массива в окрестностях тектонических нарушений прежде всего необходимо определить поле напряжений в краевой части угольного пласта и размеры зоны предельного равновесия, где напряжения превышают предел прочности. Поскольку напряжения на кромке пласта значительно превышают прочность угля и прочностные свойства вмещающих пород выше, чем угля, то угольный пласт моделируется пластическим слоем, зажатым между двумя шероховатыми плитами. В ходе построения математической модели возникает задача предельного равновесия, относящаяся к классу неупругих, ее решение осуществляется без учета деформаций и сводится к совместному решению уравнений равновесия и условий предельного состояния при заданных граничных и начальных условиях.

Предположим, что мощности сред 1 и 4 бесконечно велики, а заключенный между двумя горизонтальными границами 1,2,4 пласт 3 ограниченной мощности имеет разрыв. При этом  $B$  и  $B_1$  – размеры зон влияния нарушения и очистного забоя, где  $A$  – расстояние между ними;  $P_1$ ,  $P_{\max}$  – зона опорного давления нарушения и очистной выработки соответственно. Применение такой схемы вызвано необходимостью разработки более простых, пусть и приближенных способов учета влияния скорости подвигания очистного забоя на интенсивность метаногенерации и сейсмоакустической эмиссии. При этом имеет место движение жидкости с пузырьками газа в трещинно-поровых каналах.

Согласно закону Дарси скорости фильтрационного течения вязкой жидкости и газа в трещинно-поровом коллекторе определяются по формулам [4]:

$$u_1 = -k \frac{P_{n1} - P_{k1}}{\mu_1 L}; \quad (1)$$

$$u_2 = -k \frac{P_{n2}^2 - P_{k2}^2}{2\mu_2 L p_{n2}}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент абсолютной проницаемости,  $m^2$ ;  $u_1$ ,  $u_2$  – скорости фильтрации жидкости и газа,  $m/c$ ;  $p_{n1}$ ,  $p_{k1}$  – давления жидкости в начальном и конечном сечении канала, Па;  $p_{n2}$ ,  $p_{k2}$  – давления газа в начальном и конечном

сечения канала, Па;  $L$  – длина канала, м;  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты динамической вязкости жидкости и газа, Па·с.

При расчетах параметров фильтрационного течения двухфазной среды (вода и газ) в канале (трещине) заполненном гранулированным материалом можно воспользоваться приближенными соотношениями для коэффициентов фазовой проницаемости [4]:

$$\begin{cases} k_1 = \left( \frac{0,8 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{3,5}, & 0 \leq \varepsilon < 0,8; \\ k_1 = 0, & 0,8 \leq \varepsilon \leq 1; \\ k_2 = \left( \frac{\varepsilon - 0,1}{0,9} \right)^{3,5} (4 - 3\varepsilon), & 0,1 < \varepsilon \leq 1; \\ k_2 = 0, & 0 \leq \varepsilon \leq 0,1; \\ k_1 + k_2 < 1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – объемное содержание газообразной фазы, д.е.;  $k_1, k_2$  – коэффициенты относительной проницаемости жидкости и газа, соответственно.

Коэффициенты фазовой проницаемости определяются как

$$k_{fi} = k k_i, \quad (4)$$

где  $i = 1, 2$  (1 – вязкая жидкость, 2 – газ);  $k_i$  – коэффициенты относительной проницаемости  $i$  – той фазы.

С учетом (3), (4) соотношения (1), (2) примут вид:

$$\begin{cases} u_1 = k_i k_1 \frac{p_{n1} - p_{k1}}{\mu_1 L} = k_i \left( \frac{0,8 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{3,5} \frac{p_{n1} - p_{k1}}{\mu_1 L}, & 0 \leq \varepsilon < 0,8; \\ u_1 = 0, & 0,8 \leq \varepsilon \leq 1; \\ u_2 = k_i k_2 \frac{p_{n2}^2 - p_{k2}^2}{2\mu_2 L p_{n2}} = k_i \left( \frac{\varepsilon - 0,1}{0,9} \right)^{3,5} (4 - 3\varepsilon) \frac{p_{n2}^2 - p_{k2}^2}{2\mu_2 L p_{n2}}, & 0,1 < \varepsilon \leq 1; \\ u_2 = 0, & 0 \leq \varepsilon \leq 0,1. \end{cases} \quad (5)$$

где  $k_t = \cos^2 \alpha h^3 / 12$  – коэффициент проницаемости трещины, м<sup>2</sup>;  $h$  – величина раскрытия трещины, м;  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  – угол между осью трещины и направлением фильтрационного течения, град.

Из уравнений (5) следует, что скорость фильтрационного течения жидкости или газа обратно пропорциональна коэффициенту их динамической вязкости. При этом изменение вязкости одной фазы не приводит к изменению скорости фильтрации другой. Такой характер фильтрационного течения двухфазной среды возможен, если считать, что движение каждой из фаз происходит по индивидуальной системе микроканалов.

Уменьшение давления в двухфазной смеси приводит к высвобождению растворенного газа с образованием пузырьков. Для оценки их характерного диаметра, можно воспользоваться соотношением [5]

$$d = 80Ap^{-1}G, \quad (6)$$

где  $A$  – поправочный коэффициент, учитывающий стесненный характер движения двухфазной среды;  $p$  – давление вязкой жидкости, Па;  $G$  – коэффициент поверхностного натяжения [4], Н/м.

Скорость всплытия пузырька газа в покоящейся вязкой жидкости определяется как [6]

$$u_v = \frac{d^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{18\mu_1} \frac{3\mu_2 + 3\mu_1}{3\mu_2 + 2\mu_1}, \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>.

Рассмотрим напорное течение двухфазной среды в наклонном канале с параллельными стенками шириной  $H$ . При характерном диаметре пузырьков газа  $d \ll H$  можно пренебречь их взаимодействием между собой и со стенками. Тогда проекция вектора скорости всплытия на ось канала будет определяться как

$$u_0 = u_v \cos(90 - \alpha). \quad (8)$$

Скорость движения пузырька газа относительно стенок канала при восходящем и нисходящем течении двухфазной среды

$$u_p = u_1|_{\varepsilon=0} \pm u_0 = k_t \frac{P_{n1} - P_{k1}}{\mu_1 L} \pm u_v \cos(90 - \alpha). \quad (9)$$

где  $u_1|_{\varepsilon=0}$  – скорость жидкой фазы при  $\varepsilon = 0$ .

В выражении (9) знак «+» соответствует восходящему течению двухфазной среды, а знак «-» – ее нисходящему течению.

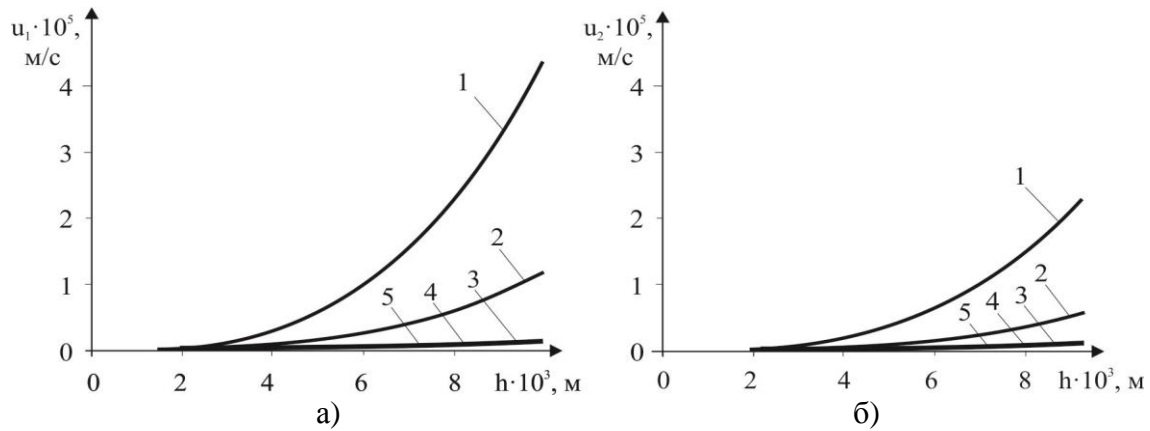
Как известно пузырьковый режим течения (газированная жидкость) наблюдается при газосодержании  $\varepsilon < 0,2-0,3$  [7, 8]. Принимая  $\varepsilon \leq 0,25$ , для средней скорости течения двухфазной среды запишем [5, 6]

$$u = U_1 + U_2 = u_1|_{\varepsilon=0} (1 - \varepsilon) + u_p \varepsilon. \quad (10)$$

где  $U_1, U_2$  – приведенные скорости течения жидкости и газа, м/с.

Если пластовое давление совпадает с давлением насыщения флюида газом, то жидкость находится в насыщенном состоянии. Движение газожидкостных

систем в пористой среде сопровождается фазовыми переходами, которые влияют на характеристики фильтрации при изменении давления. На рис. 2 представлены результаты расчета по формуле (5) скорости фильтрации жидкости и газа в наклонной трещине.



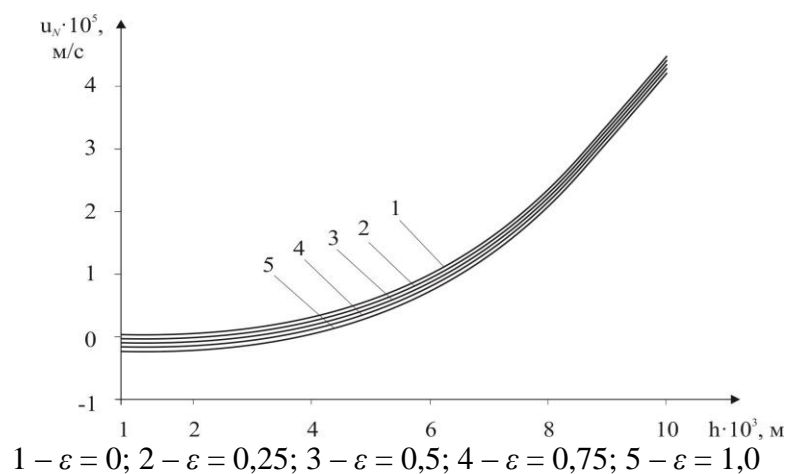
1 -  $\varepsilon = 0$ ; 2 -  $\varepsilon = 0,25$ ; 3 -  $\varepsilon = 0,5$ ; 4 -  $\varepsilon = 0,75$ ; 5 -  $\varepsilon = 1,0$

Рисунок 2 – Зависимость скорости фильтрации воды (а) и метана (б) в наклонной трещине ( $\alpha = 45^\circ$ ) длиной 1 м от величины ее раскрытия и газосодержания

Движение выделенного объема жидкости в пористой среде связано с изменением давления в нем и, соответственно, происходит выделение газа из жидкости. Изменение давления, а значит, и выделение газа, зависит от скорости движения в коллекторе. Давление может изменяться в каждой точке во времени. В общем случае для одномерного потока

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{v}{m} + \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (11)$$

Расчет скорости нисходящего фильтрационного течения двухфазной среды в наклонной трещине представлен на рис. 3.



1 -  $\varepsilon = 0$ ; 2 -  $\varepsilon = 0,25$ ; 3 -  $\varepsilon = 0,5$ ; 4 -  $\varepsilon = 0,75$ ; 5 -  $\varepsilon = 1,0$

Рисунок 3 – Зависимость скорости двухфазного нисходящего фильтрационного течения в наклонной трещине ( $\alpha = 45^\circ$ ) длиной 1 м от величины ее раскрытия и газосодержания

Как следует из представленных результатов, скорость двухфазной среды принимает отрицательные значения в диапазоне  $h = 0,001 \dots 0,0038$  м. Это объясняется тем, что величина скорости всплытия в указанном диапазоне превосходит скорость течения жидкой фазы. Из термодинамики известно, что процесс фазовых превращений можно считать равновесным, если  $\partial P / \partial t = 0$ . При больших значениях  $\partial P / \partial t$  процесс неравновесный и количество новой фазы определяется не только значением давления, но и скоростью его изменения. Для газонасыщенных систем неравновесный характер фазовых превращений проявляется когда  $\frac{\partial P}{\partial t} \geq 10^{-3} - 10^{-2}$  МПа/с.

Рассматривая радиальный поток, наибольшее значение  $\partial P / \partial t$  получим в призабойной зоне. Это может быть неравновесный процесс разгазирования флюида, порождающий упругие колебания. В процессе дегазации также выделяют докавитационный (пульсация пузырьков преимущественно без схлопывания) и кавитационный режимы. Процесс дегазации происходит вплоть до установления нового значения равновесной концентрации.

При моделировании двухфазных фильтрационных течений учитывались гидродинамические особенности движения каждой из фаз, а также их физические свойства, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства флюида при моделировании двухфазного фильтрационного течения

Флюид	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Концентрация $c, \%$	Коэффициент динамической вязкости $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	Краевой угол смачиваемости при концентрации 20% $\theta, \text{град}$
Вода дистиллированная	22	0	1,0	10
Вода шахтная минерализованная	22	15	1,4	15
Водный раствор ПАВ (анионный)	22	20	1,64	60
Водный раствор ПАВ (катионный)	24	20	1,98	63
Водный раствор лигносульфоната (ЛС)	23	20	2,8	55

Практически всякая жидкость содержит газ в растворенном виде и в виде пузырьков. Растворимость основного компонента природного газа - метана в пластовой воде незначительно, но имеет место. Поведение жидкости и газа можно оценить на примере одиночного пузырька. В жидкости, находящейся под давлением  $P_0$ , на пузырек газа радиусом  $r$  действуют следующие силы: гидростатическое давление  $P_0$ , поверхностное натяжения  $2\sigma/r$ , стремящееся сжать, и давление газа  $P_r$ , противостоящие сжатию. Результирующее давление

$$P = P_r + P_n - P_0 - 2\sigma/r \quad (12)$$

При  $P > 0$  увеличиваются, а при  $P < 0$  уменьшаются размеры пузырька. При достаточном количестве маленьких пузырьков газа, дегазация жидкости может происходить за счет их слияния, причем, в зависимости от газового фактора, вязкости, поверхностного натяжения дегазация протекает как лучше, так и хуже. Большую роль играет разность пластового давления  $P_0$  и давления насыщения. Если эта разность соответствует давлению метастабильной зоны, то дегазация и кавитация в флюиде возможны при малой интенсивности сторонних воздействий. Влияния флюидонасыщенности на изменение напряженно состояния оценивается путем введения эффективного давления  $\sigma_x - P$ . Это вызвано необходимостью учета перераспределения флюида при изменении горного давления в процессе подвигания очистного забоя.

Для описания напряженного состояния угольного массива в окрестностях тектонических нарушений, необходимо определить поле напряжений в краевой части угольного пласта и размеры зоны предельного равновесия. Поскольку напряжения на кромке пласта значительно превышают прочность угля, а прочностные свойства вмещающих пород выше, чем угля, то угольный пласт моделируется пластическим слоем, зажатым между двумя шероховатыми плитами. В ходе построения математической модели возникает задача предельного равновесия, относящаяся к классу неупругих, ее решение осуществляется без учета деформаций и сводится к совместному решению уравнений равновесия и условий предельного состояния при заданных граничных и начальных условиях [1, 3].

Допустим  $x_1$  – размер зоны предельного равновесия, а изменение нормального напряжения  $\sigma_{y1}(x)$  в зоне опорного давления определяется из выражения:

$$\sigma_{y1}(x) = \begin{cases} g_1 e^{kx} - g_2, & \text{если } 0 \leq x \leq x^*; \\ AK_1 h^{-1}(x - x^*) + \omega, & \text{если } x^* \leq x \leq x_1. \end{cases} \quad (13)$$

Напряжения в упругой зоне пласта, для которой  $x > x_1$  вычисляются по формуле

$$\sigma_{y1}(x) = K_f \gamma H \left\{ 1 + (K_f \gamma H)^{-1} [AK_1 h^{-1}(x_1 - x^*) + \omega - K_f \gamma H]^{(1-x)(1-x)} (N-1)^{(x-x)(1-x)} \right\} \quad (14)$$

Вторая часть решения состоит в определении поля напряжений от тектонического нарушения, моделируемого эллиптическим включением с варьируемыми осями и углом наклона. Для этого рассмотрим упругую бесконечную область, подверженную однородному двухосному растяжению на бесконечности. Область содержит эллиптическое включение из другого материала, напряженное состояние которого считается однородным. Так как различие температур включения и основного материала не учитываем, то полагаем смещения непрерывными на границе раздела двух сред.

Бесконечная область находится в условиях плоского напряженного



состояния, для которого эффективным является использование методов теории аналитических функций и введение комплексной переменной  $z = x+iy$ , где:  $x$  и  $y$  – декартовы координаты. Эллиптическая граница раздела упругих сред  $L$  описывается уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (15)$$

где  $a$  и  $b$  – полуоси эллипса,  $a = R(1+m)$ ;  $b = R(1-m)$ ;  $m$  и  $R$  – параметры эллипса.

Напряжения и смещения в плоской задаче теории упругости можно представить с помощью комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили  $f(z)$  и  $k(z)$ , которые являются аналитическими функциями комплексного переменного  $z$  всюду в области, занятой однородной упругой средой:

$$\begin{cases} \sigma_x + \sigma_y = 4 \operatorname{Re} f'(z); \\ -\sigma_x + \sigma_y + 2i\tau_{xy} = 2[zf''(z) + k''(z)]; \\ 2\mu(u + iv) = xf(z) - f'(z) - k(z), \end{cases} \quad (16)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  – компоненты напряжений;  $u$  и  $v$  – компоненты перемещений соответственно по осям  $x$  и  $y$ ;  $\mu$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Контур эллипса является линией, на которой комплексные потенциалы  $f(z)$  и  $k(z)$  терпят скачок. Определим граничные условия задачи: всюду на границе контакта  $L$  плотное прилегание; в этом случае нормальные и касательные напряжения на любой дуге, являющейся частью  $L$ , будут непрерывны справа и слева от дуги, а, следовательно, будут непрерывны образуемые ими главные векторы

$$f(z) + zf'(z) + k_1(z) = f_2(z) + zf_2'(z) + k_2(z), \quad (17)$$

где точка  $z$  принадлежит контуру  $L$ .

Обозначая с индексом «1» все величины, относящиеся к включению, а с индексом «2» – к основному материалу, запишем условия на бесконечности.

Будем считать, что при  $z^\infty$  действуют постоянные напряжения  $\sigma_x = \sigma_{x^\infty}$ ,  $\sigma_y = \sigma_{y^\infty}$ . В нашем случае  $\sigma_{y^\infty} = \gamma H$ ,  $\sigma_{x^\infty} = \lambda \gamma H$  ( $\gamma$  – удельный вес вмещающих пород,  $H$  – глубина разработки,  $\lambda$  – коэффициент бокового подпора). При этом:

$$\begin{cases} f_2(z) = \frac{1}{4}(\sigma_{x^\infty} + \sigma_{y^\infty})z + \theta\left(\frac{1}{z}\right); \\ k_2(z) = \frac{1}{2}(\sigma_{y^\infty} - \sigma_{x^\infty} + 2i\tau_{xy^\infty})z + \theta\left(\frac{1}{z}\right). \end{cases} \quad (18)$$

Напряжения во включении постоянны и равны величинам  $\sigma_x = \sigma_x^0$ ,  $\sigma_y = \sigma_y^0$ ,  $\tau_{xy} = \tau_{xy}^0$ , которые должны быть определены в процессе решения.

В составном теле на границе  $L$  для смещений из (2) находим граничное условие

$$\frac{x_1 f_1(z) - z f_1'(z) - k_1(z)}{\mu_1} = \frac{x_2 f_2(z) - z f_2'(z) - k_2(z)}{\mu_2}. \quad (19)$$

Функции  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $k_1$  и  $k_2$  определяем из краевых условий (16), (17), (18) на эллипсе  $L$ .

Из условия статического равновесия, выраженного в равенстве дополнительных нагрузок в зоне опорного давления нагрузке  $P$ , приложенной к пласту в результате зависания пород, получаем трансцендентное уравнение для определения размера зоны предельного равновесия  $x_1$ . Контур эллипса является линией, на которой комплексные потенциалы  $f(z)$  и  $k(z)$  терпят скачок. Определим граничные условия задачи: всюду на границе контакта  $L$  плотное прилегание; в этом случае нормальные и касательные напряжения на любой дуге, являющейся частью  $L$ , будут непрерывны справа и слева, а следовательно, будут непрерывны образуемые ими главные векторы.

Используя выражения для функций  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $k_1$  и  $k_2$  и соотношение (13), после ряда преобразований найдем поле напряжений в результате суперпозиции решения о напряженном состоянии в краевой части угольного пласта и решения о возмущении, вносимом геологическим нарушением:

$$\begin{cases} \sigma_x + \sigma_y = \frac{2\mu_1 + \mu_2(x_1 - 1)}{\mu_1(1 + x_2)}(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) + \sigma_{y1}(x) + \frac{4}{1 + x_2} \operatorname{Re} \left( A \frac{m\zeta^2 - 1}{\zeta - m} \right) + \frac{1}{A} \cdot \left[ g_1(e^{kh} - 1) - \frac{MQx}{x_1} \right]; \\ \sigma_x - \sigma_y + 2i\tau_{xy} = \frac{x_2\mu_1 + \mu_2}{\mu_1(1 + x_2)}(\sigma_x^0 + \sigma_y^0 + 2i\tau_{xy}^0) + \frac{4Az(1 - m^2)\zeta^3}{R(1 + x_2)(\zeta^2 - m)^3} - \frac{2A}{1 + x_2} \times \\ \times \frac{m^2\zeta^4(\zeta^2 - 3m) + 3\zeta^2 - m}{(\zeta^2 - m)^3} + \frac{D(\sigma_x^0 + \sigma_y^0)}{1 + x_2} \cdot \frac{m\zeta^2 - 1}{\zeta^2 - m} + \sigma_{y1}(-x) - \frac{g_1}{A}(e^{kh} - 1) + \frac{MQ}{Ax_1}x, \end{cases} \quad (20)$$

где  $\sigma_{y1}(x)$  определяется соотношением (14).

Уравнения (20) при подстановке значений координат  $x$ ,  $y$  и комплексной переменной  $\zeta$  определяют поле напряжений в призабойной части угольного пласта в зоне влияния тектонических нарушений. В пределах области, размеры которой могут существенно превышать зону дробления или развития опережающих разрывов и физико-химического преобразования, оценивается роль флюидов в формировании напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угленородный массив Донбасса как гетерогенная среда / А.Ф. Булат, Е.Л. Звягильский, В.В. Лукинов [и др.]. – К.: Наукова думка, 2008. – 411 с.

2. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries / T. Xu, C.A. Tang, T.H. Yang [and others] // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – № 4. – 2006. – Pp. 905-919.

3. Линьков А.М. Метод решения трехмерных задач о пластовых выработках в геологических нарушениях / А.М. Линьков, В.В. Зубков, М.А. Хейб // ФТПРПИ. – 1997. – №4. – С. 3-25.

4. Подземная гидравлика: Учебник для вузов / К.С. Басниев, А.М. Власов, И.Н. Кочина, В.М. Максимов. – М.: Недра, 1986. – 303 с

5. Кучма А.Е. Стационарный рост газового пузырька в сильно перенасыщенном растворе газа в жидкости / А.Е. Кучма, Г.Ю. Гор, Ф.М. Куни // Научное приборостроение. –2008. – Т.18. – №4. – С. 124 – 128.

6. Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: МЭИ, 2000. – 374 с.

7. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика / В.Н. Николаевский // М.: Недра, 1996,- 447 с.

8. Гольф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / Т.Д. Гольф-Рахт. – М.: Недра, 1986. – 608 с.

#### REFERENCES

1. Bulat A.F., Zvyagylsky Ye.L. and Lukinov V.V. (2008), *Ugleporodnyy massiv Donbassa kak geterogennaya sreda* [Coal-rock massif of Donbass as heterogen environment], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

2. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries / T. Xu, C.A. Tang, T.H. Yang [and others] // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – N.4. – 2006. – Pp. 905-919.

3. Lin'kov A.M. Method for solution of three-dimension problems about bed tunnels in geological disturbances / A.M. Lin'kov, V.V. Zubkov, M.A. Heib // FTPrPI. – 1997. – N.4. – Pp. 3-25.

4. Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N., Maksimov V.M. (1986), *Podzemnaya gidravlika: Uchebnik dlya vuzov* [Underground Hydraulics: Textbook for Universities], Nedra, Moscow, Russia.

5. Kuchma A.E. Stationary gas bubble growth in the highly supersaturated solution of the gas in the liquid / A.E. Kuchma, G. Y. Gor, F.M. Kuni // Scientific Instrument. –2008. – V.18. – N.4. – Pp. 124 – 128.

6. Labuntsov D.A., Yagov V.V. (2000), *Mehanika dvuhfaznyih sistem: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Mechanics of two-phase systems: A manual for schools], MEI, Moscow, Russia.

7. Nikolaevskiy V.N. (1996), *Geomehanika i fluidodinamika* [Geomechanics and fluidodynamics], Nedra, Moscow, Russia.

8. Golf-Raht T.D. (1986), *Osnovy neftepromyislovooy geologii i razrabotki treschinovatyih kollektorov* [Basics oilfield geology and development of fractured reservoirs ], Nedra, Moscow, Russia.

#### Об авторах

**Булат Анатолий Федорович**, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепрпетровск, Украина, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Пилипенко Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепрпетровск, Украина, [geotechnika@mail.ua](mailto:geotechnika@mail.ua)

**Новиков Леонид Андреевич**, инженер, младший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепрпетровск, Украина, [lnov71@yandex.ru](mailto:lnov71@yandex.ru)

#### About the authors

**Bulat Anatoly Fedorovich**, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Pilipenko Yuriy Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [geotech-](mailto:geotech-)

[nika@mail.ua](mailto:nika@mail.ua)

*Novikov Leonid Andreevich*, engineer, Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [lnov71@yandex.ru](mailto:lnov71@yandex.ru)

**Анотація.** Представлено аналітичний опис напруженого стану вугільного пласта, що включає тектонічне порушення із зімкнутими берегами. Область порушення представлена у вигляді еліптичного включення. Введення комплексної змінної в систему рівнянь при підстановці значень поточних координат  $x$ ,  $y$  визначає поле напружень в привибійній частині вугільного пласта в зоні впливу тектонічного порушення в межах області, розміри якої можуть істотно перевищувати зону дроблення, розвитку розривів і фізико-хімічного перетворення, з урахуванням ролі флюїдів у формуванні деформацій. Напружений стан визначається у вигляді суперпозиції двох рішень про опорний тиск вугільного пласта і зони розривної дислокації. Зміна параметрів еліптичного включення і фізико-механічних властивостей вугільного пласта дозволяє оцінити напружений стан широкого класу розривних структур.

**Ключові слова:** тектоніка, напруження, розривні структури, флюїд.

**Abstract.** An analytical description of the coal seam stress state, including tectonic disturbance with closed beaches was represented. Disturbance area was presented as elliptical inclusion. Introduction of a complex variable in the equations system by substituting the values of the current coordinates  $x$ ,  $y$  has to determine the stress field in the bottom hole of the coal seam in the zone of tectonic disturbance within the area, the size of which may substantially exceed the crushing area, feathering development gaps and physical-chemical conversion, taking into account role of fluids in the formation of deformations. Stress state is defined as a superposition of two solutions of the reference pressure of the coal seam and discontinuous dislocation zone. Changing the parameters of the elliptical inclusion and physical-mechanical properties of the coal seam help to evaluate state state of a broad class of discontinuous structures.

**Keywords:** tectonics, stress state, discontinuous structure, fluid.

*Статья поступила в редакцию 15.01.2016*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым*