

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ ГОРНОГО МАССИВА
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

Стаття представляє концепцію механізму перерозподілу напруги при гідродинамічній дії на напружений газонасичений гірський масив через свердловину з витяганням вугілля і газу і створення за рахунок цього вторинної пористості в оброблюваній дією зоні.

**PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE STRESS REDISTRIBUTION
IN THE PROCESSING ZONE OF ROCK MASS HYDRODYNAMIC
INFLUENCE**

The article introduces the concept of the mechanism of stress redistribution under hydrodynamic influence on the tense gas-saturated rock mass through the borehole with the extraction of coal and gas and formation at the expense of secondary porosity in the processed area.

Известны различные теории перераспределения напряжений вокруг выработок в горном массиве, но до настоящего времени нет однозначной концепции его самоорганизации, как природного явления.

Предлагаемая концепция базируется на законе сохранения энергии и учитывает энергию сжатой породы в процессе перераспределения напряжений в зоне обработки горного массива гидродинамическим воздействием при образовании в ней вторичной пористости и не высвободившуюся энергию сжатой породы, стремящуюся восстановить свой объем вокруг зоны образования вторичной пористости.

Результаты исследований взаимодействия гидродинамического воздействия с напряженным газонасыщенным массивом, проведенных ИГТМ НАН Украины на шахтах Донбасса, явились основой научных открытий №123, №184 и №228 [1-3].

При подаче воды в скважину под давлением она, проникая по трещинам разгруженной зоны, создает объемное давление на каждый фрагмент породы и, в определенной степени, выравнивает напряжения в ней вплоть до зоны опорного давления и создает волну давления (нагрузки).

При сбросе давления воды в скважине она за счет разности давления фильтрует в направлении центра скважины, увлекая за собой фрагменты угля, которые образовались за счет резкого сброса давления. В зоне опорного давления за счет обратной волны разгрузки происходит дезинтеграция угля по типу образования разгруженной зоны вокруг скважины.

Таким образом, после сброса давления воды в скважине она увлекает за собой фрагменты угля, а разрушенные фрагменты заполняют пространство вынесенных и происходит поочередное смещение их к центру скважины, зона разгрузки расширяется, а зона опорного давления отодвигается вглубь массива.

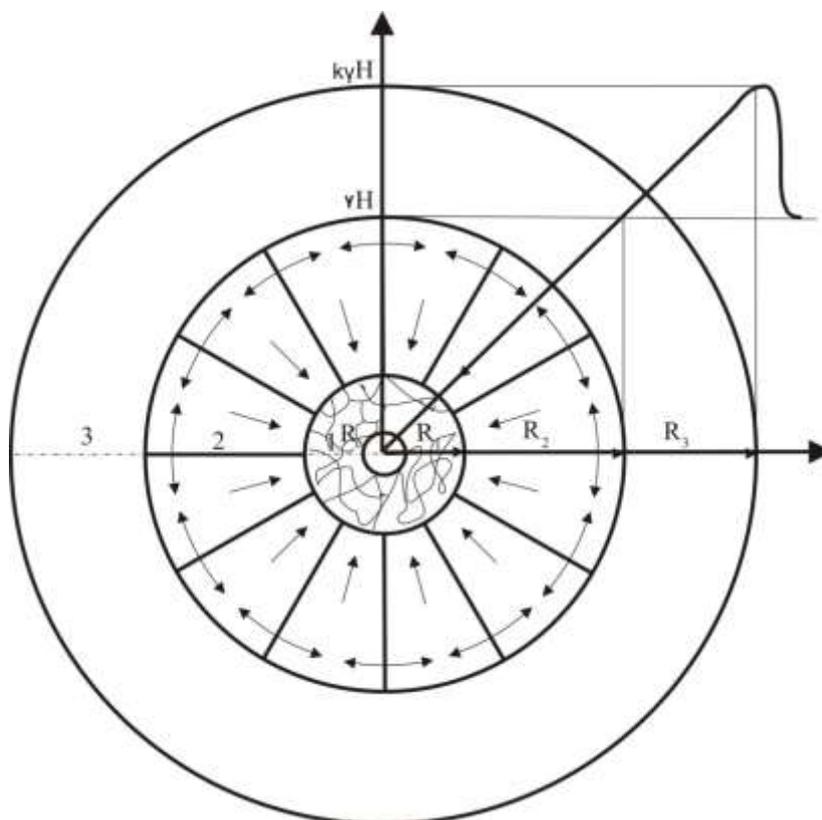
При повторных циклах уголь в скважине постоянно дезинтегрируется и постепенно заполняет мелкоизмельченным углем значительный объем простран-

ства без образования открытой полости в горном массиве из-за постоянного процесса замещения объема извлеченного угля вновь разрушенным.

Нетронутый горный массив находится в состоянии гидростатического сжатия, т. е. горное давление всесторонне сжимает породу в пределах ее упругих деформаций по координатам X, Y, Z . При бурении скважины и при образовании дополнительной пористости пород при ГДВ, сжатая горная порода вокруг них стремится разжаться.

Согласно физической теории твердого тела [4] это расширение горной породы центростремительное и направлено к геометрическому центру окружности, описанной вокруг зоны ослабления напряжений, а в объемном представлении – к геометрическому центру шара.

Центростремительное расширение горной породы к геометрическому центру окружности, описанной вокруг скважины и зоны ослабления напряжений вызывает сжатие горной породы по концентрическим окружностям вокруг зон ослабления напряжений. Этот процесс сжатия горной породы можно представить в виде самосжимающихся радиусных клиньев центростремительно расширяющейся горной породы (рис. 1).



1 – зона отсутствия касательных напряжений (зона отжима);

2 – зона низких касательных напряжений и упругих деформаций (зона частичной разгрузки);

3 – зона высоких касательных напряжений и высокой жесткости массива.

Рис. 1 – Модель перераспределения напряжений в зоне обработки горного массива

Увеличение напряжений сжатия горной породы в каждой последующей концентрической зоне растет, что увеличивает ее жесткость и несущую способность. Зона 3 достигнет максимальной несущей способности когда горная порода в ней достигнет абсолютной жесткости, достаточной для изоляции обработанной зоны 2 от притока энергии из глубины напряженного горного массива. Таким образом, процесс перераспределения энергии остановится и образуется относительно равновесная трехзонная подсистема.

Зона 3 с максимальным кольцевым напряжением и высокой жесткостью является защитной оболочкой для зон 2 и 1.

Кольцевое напряжение горной породы в зоне 3 должно быть

$$\sigma_3 = \sigma_0 + \sigma_n, \text{ т/м}^2 \quad (1)$$

где σ_3 – кольцевое максимальное напряжение горной породы в третьей зоне высокой жесткости, т/м²; σ_0 – начальное напряжение в нетронутом горном массиве, т/м²; σ_n – напряжение от кинетической энергии горной породы первой и второй зон, т/м².

Первичное напряжение горной породы в зоне 1 передается горной породе зоны 3 в период образования зоны 2. В результате остальная краевая горная порода, находящаяся внутри описывающей эту зону 1 окружности, не имеет кольцевых напряжений и не может их иметь, потому что в площади ее расположения нет целых колец из горной породы, так как она разгружена из-за выхода угля и газа и образования дополнительного объема пористости.

Горная порода внутри окружности, описывающей зону 1, и есть зона отсутствия кольцевых напряжений и пластических деформаций.

Радиус окружности, описывающей зону 1 – R_1 . Тогда ширина зоны 1 будет равна

$$M_1 = R_1 - R_c, \text{ м} \quad (2)$$

где R_c – радиус скважины, м.

Горная порода, расположенная между 1 и 3 зонами, находится в зоне 2 – зоне упругих деформаций и низких кольцевых напряжений, напряжение которой передается третьей зоне.

Радиус окружности, описывающей зону 2 – R_2 .

Тогда ширина зоны 2 будет

$$M_2 = R_2 - R_1, \text{ м} \quad (3)$$

Аналогично для зоны 3

$$M_3 = R_3 - R_2, \text{ м} \quad (4)$$

Для определения количества извлекаемого из скважины угля при достиже-

нии необходимой вторичной пористости, обеспечивающей эффективную дегазацию и перераспределение горного давления в зоне ведения горных работ до безопасной величины из закона Бойля-Мариотта получаем

$$P_0V_0 = P_1V_1 = P_2V_2, \text{ т}\cdot\text{м} \quad (5)$$

Если P_0 – атмосферное давление, т/м²; V_0 – объем пор при давлении P_0 и m_0 – пористость угля при этом давлении; P_1 – давление γH (γ – объемный вес пород, т/м³); V_1 – объем пор при давлении P_1 и m_1 – пористость угля при этом давлении; $P_2 = k\gamma H = kP_1$; V_2 – объем пор при давлении P_2 и m_2 – пористость угля при этом давлении, тогда можно записать

$$P_0m_0 = P_1m_1 = P_2m_2, \text{ кН/м}^2$$

Из $P_0m_0 = P_1m_1$ получим

$$m_1 = \frac{P_0m_0}{P_1}$$

Из $P_1m_1 = P_2m_2$ получим

$$m_2 = \frac{P_1m_1}{P_2} = \frac{P_1m_1}{kP_1} = \frac{m_1}{k} \quad (6)$$

Для разгрузки угольного пласта в обрабатываемой зоне радиусом $R_{эф}$ необходимо снизить горное давление в ней с P_2 до P_1 и, следовательно, увеличить пористость угля с m_2 до m_1 на величину Δm (см. рис. 1). При этом необходимо извлечь объем угля равный объему пор соответствующему увеличению пористости на Δm .

Если принять глубину ведения очистных работ $H = 1000$ м, атмосферное давление $P_0 = 1 \text{ атм} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10 \text{ т/м}^2$, пористость угля $m_0 = 0,05$ (5%) и коэффициент концентрации напряжений $k = 1,2$ тогда в зоне 2 необходимо увеличить пористость угля по сравнению с его значением при давлении P_0 на

$$m_1 = \frac{P_0m_0}{P_1} = \frac{10 \cdot 0,05}{250} = 0,002,$$

а в зоне 3 на

$$m_2 = \frac{m_1}{k} = \frac{0,002}{1,2} = 0,0017$$

Полученные значения увеличения пористости угля в зонах 1 и 2 по своей сути есть статистический геотехнологический коэффициент влияния гидродинамического воздействия на разгрузку угольного пласта от горного давления k_c , который определяет необходимую долю извлечения угля из обрабатываемой зоны для обеспечения эффективной разгрузки пласта [5].

Высокая динамика воздействия при сбросе рабочей жидкости из скважины приводит к быстрому изменению газового и механического равновесия в массиве и способствует развитию управляемого газодинамического явления. При этом наблюдается быстрое нарастание в выбрасываемой суспензии содержания твердой фазы с одновременным уменьшением его крупности вплоть до образования смеси угольной пыли с газом вылетающей из скважины с высокой скоростью. При закрывании задвижки происходит мгновенный подъем давления за счет давления газа, что исключает дополнительную подачу воды в скважину. Изменение структуры угля происходит следующим образом (рис. 2).

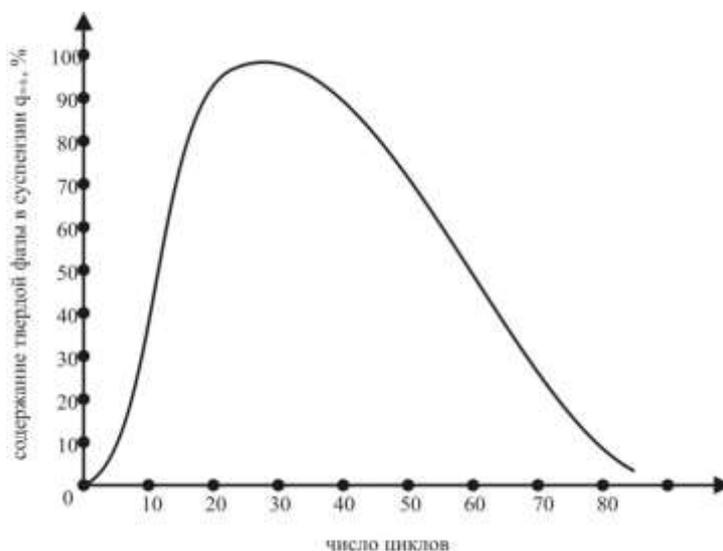


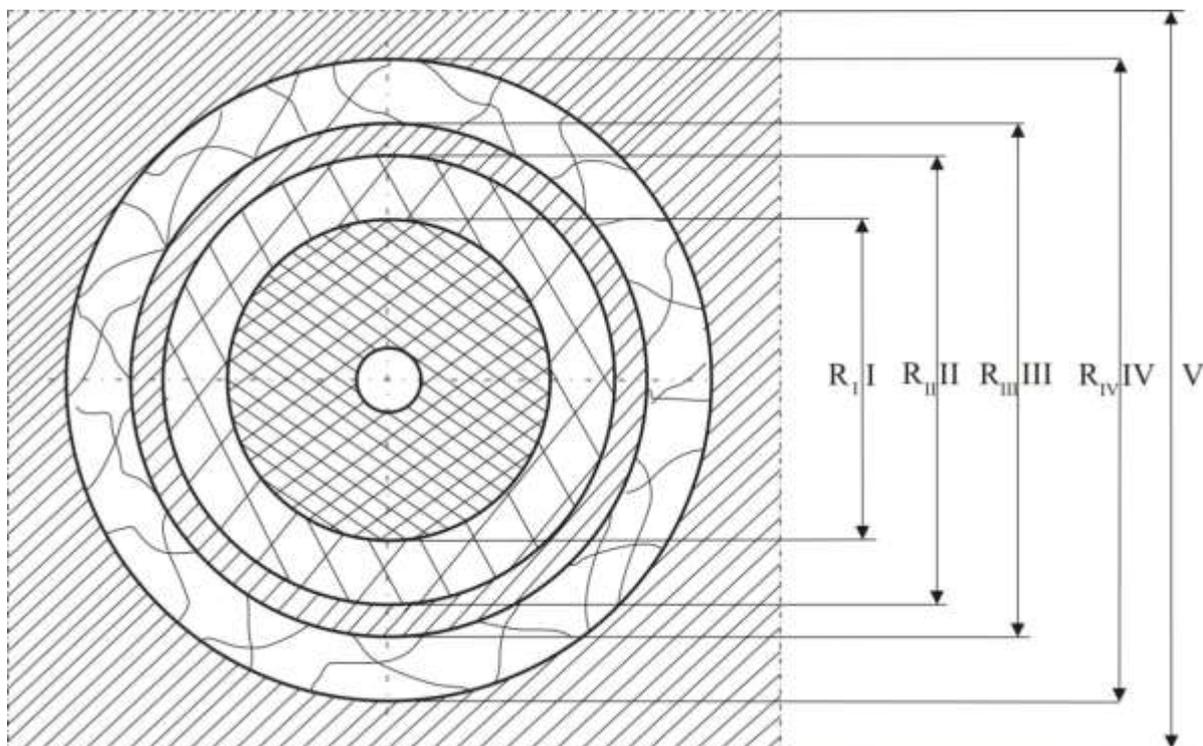
Рис. 2 - Изменение содержания твердой фазы в суспензии при гидродинамическом воздействии через подземные скважины

Во время первых 5-10 циклов воздействия осуществляется фильтрация чистой воды через поры и трещины прискважинной зоны пласта. Вода смачивает обнаженные поверхности, проникая внутрь трещиновато-пористой структуры. На этой стадии $T/Ж = 0$.

Далее происходит образование связанной воды в порах и капиллярах угля с последующим послойным отрывом заполненного водой слоя и выход из скважины суспензии с $T/Ж \approx 0,05$ с содержанием твердой фазы класса 5,0–7,0 и 7,0–10,0 порядка 4,0-5,0 %.

Процесс дальнейшего изменения содержания твердой фазы в суспензии и свойств угольного пласта и рабочей жидкости зависит от режимных параметров гидродинамического воздействия.

Таким образом, в результате гидродинамического воздействия на угольный массив разрушенный уголь образует на обработанной площади зоны, содержащие частицы угля различного гранулометрического состава. Расположение этих зон показано на феноменологической модели гидродинамического разрушения угля на рис. 3.



- R_I - зона разрушения угля до мелких фракций;
- R_{II} - то же до фракций средней величины;
- R_{III} - то же до фракций крупной величины;
- R_{IV} - зона с открытыми трещинами;
- V - зона с закрытыми трещинами

Рис. 3 - Схема гидродинамического разрушения угля вокруг скважины

Для оценки степени разрушения угля в обработанной гидродинамическим воздействием зоне проведен ситовый анализ угля из пластов l_7 – «Пугачевка» и k_8 – «Каменка». Данные анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Ситовый анализ угля и границы распространения фракций различных классов в обработанной зоне

Пласт	Классы, мм	Выход фракций		Радиус распространения R_i , м
		Г	%	
l_7 – «Пугачевка»	>10	34	1,7	0,4
	7,0-10,0	47	2,4	0,6
	2,0-7,0	240	12,0	3,0
	0,5-2,0	423	21,2	5,3
	<0,5	1250	62,7	15,7
k_8 – «Каменка»	>10	27	2,5	0,6
	7,0-10,0	39	3,6	0,9
	2,0-7,0	165	15,3	3,8
	0,5-2,0	215	20,0	5,0
	<0,5	632	58,6	14,7

Из таблицы 1 видно, что дезинтегрированный уголь в зоне представлен в основном фракциями классов до 0,5 и 0,5-2,0 мм (83,9%).

Из приведенных данных следует еще один вывод: природная газоносность

угольных пластов оказывает влияние на выход фракций различных классов: с ростом природной газоносности пласта увеличивается выход угля низких классов.

По данным ситового состава углей были определены размеры зон дезинтегрированного угля вокруг технологической скважины с учетом конечной величины радиуса эффективного влияния гидродинамического воздействия. Для некоторых выбросоопасных угольных пластов они составили:

$$l_7 - \text{«Пугачевка»} \\ l_I = 19,9 \text{ м} \quad l_{II} = 5,7 \text{ м} \quad l_{III} = 1,4 \text{ м}$$

$$k_8 - \text{«Каменка»} \\ l_I = 17,9 \text{ м} \quad l_{II} = 6,9 \text{ м} \quad l_{III} = 2,2 \text{ м}$$

$$l_5 - \text{«Соленый»} \\ l_I = 15,1 \text{ м} \quad l_{II} = 9,6 \text{ м} \quad l_{III} = 2,3 \text{ м}$$

$$l_1 - \text{«Мазур»} \\ l_I = 18,1 \text{ м} \quad l_{II} = 7,4 \text{ м} \quad l_{III} = 1,5 \text{ м}$$

Согласно феноменологической модели гидродинамического воздействия на угольный массив образуются несколько зон различного фракционного состава, имеющим осредненную ширину:

- зона разрушения угля до мелких фракций – 17,8 м;
- зона разрушения угля до фракций средней величины – 7,4 м;
- зона разрушения угля до крупных фракций – 1,8 м.

Таким образом, феноменологическая модель перераспределения напряжений вокруг зоны обработки горного массива гидродинамическим воздействием показывает на какую величину необходимо увеличить пористость пласта для обеспечения его эффективной разгрузки, также дает возможность определить границы распространения дезинтегрированного угля различных фракций в объеме обработанной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научное открытие «Закономерность разрушения пористых газонасыщенных тел при циклическом гидродинамическом воздействии» / Е.Г. Барадудин, К.К. Софийский, Е.А. Воробьев [и др.] // Сб. «Научные открытия». – М. – С.П., 2002. - №123. 128 с.
2. Научное открытие «Явление спонтанного разрушения напряженного пористого газонасыщенного массива» / Е.Г. Барадудин, Е.А. Воробьев, К.К. Софийский [и др.] // Сб. «Научные открытия». – М., 2002. - №184. 128 с.
3. Научное открытие «Явление возникновения циклической динамической пригрузки угольного пласта при его циклическом гидродинамическом нагружении» / Д.М. Житленок, А.В. Аксенов, Е.Г. Барадудин [и др.] // Сб. науч. отк. ученых Украины. – К.: Ин-т гос. и права им. В.М. Корецкого НАНУ, 2004. - №228. – С.77-78.
4. Макушок Е.М. Механика твердого деформируемого тела, учитывающая элементы самоорганизации деформационного процесса / Е.М. Макушок // Металлургия. – 1999. - №24. – С.103-104.
5. Пат. №58316 України, МПК E21F7/00. Спосіб визначення ефективних параметрів дегазації і розвантаження вугільного пласта гідродинамічною дією / К.К. Софійський, Д.М. Житльонко, Є.Г. Барадудін, О.В. Московський, О.П. Петух, В.І. Гаврилов, В.В. Власенко (Україна). - u2010 11020; заявл. 13.09.2010; опубл. 11.04.2011; Пріоритет від 13.09.2010; Бюл. № 7. – 3 с.

**НАГНЕТАНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТУЮ СРЕДУ
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Отримано рівняння, що описують фільтрацію в напруженій трещиновато-пористому середовищу з кінцевим числом напрямків орієнтації тріщин. Проведено аналіз отриманих рівнянь та відповідність їх, виходячи з конкретних умов нагнітання, відомим раніше рівнянням фільтрації

**INFUSION OF LIQUID INTO CRACKS-POROUS ENVIRONMENT
TAKING INTO ACCOUNT CHANGE OF ITS TENSE STATE**

The equations circumscribing a filtration in a tight cracks-porous environment with final number of directions of orientation of cracks are obtained. The analysis of the obtained equations and conformity them is conducted, outgoing from concrete conditions of pressure known earlier equations of a filtration

Известно, что водопроницаемость геологических образований, и в частности углей, в большой мере зависит от напряженного состояния. При этом, так как напорная фильтрация, в основном, происходит по макропорам, наиболее крупными из которых являются трещины, то становится очевидным, что для правильного описания процесса необходимо строго учитывать пространственную ориентацию трещин в поле действия напряжений. Однако известные модели нагнетания либо вообще не учитывают влияние напряжений, либо содержат зависимости коэффициента проницаемости от первого инварианта тензора напряжений [1, 2, 3], что приемлемо лишь при равновероятной ориентации трещин, и вряд ли допустимо для углей, где наблюдается ярко выраженная слоистая ориентация эндогенных трещин.

Для описания нагнетания жидкости в угольный пласт будем использовать модель трещиновато-пористой среды, то есть принимать материал как совокупность двух вложенных одна в другую пористых сред, обладающих своими собственными фильтрационными характеристиками и обменивающимися между собой массой жидкости. При этом для одной из пористых сред предполагаются существенно более высокие значения проницаемости (трещины), а для другой – пористости (блоки). Деформации материала считаем упругими, фильтрацию – линейной (закон Дарси), зависимость плотности жидкости от давления также линейной, а вязкость жидкости – постоянной.

Следуя [4], будем рассматривать наполненный жидкостью трещиновато-пористый материал как композит, состоящий из пористой матрицы и распределенных в ней трещин. Пористая матрица, в свою очередь, вновь рассматривается как композит, состоящий из твердого каркаса и наполненных жидкостью пор. Тогда компоненты тензора напряжений в материале можно представить в виде:

$$\sigma_{ij} = (1 - m_1) \sigma_{ij}^{(1)} + m_1 P_1 \delta_{ij}, \quad (1)$$