

В.В. Зберовский, с. н. с.
(ИГТМ),

Ю.А. Костандов, в. н. с.,

Л.Я. Локшина, н. с.

(ТНУ им. В.И. Вернадского)

УЧЕТ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ УГЛЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Розглянуто умови гідровіджиму при гідроімпульсній дії на вугільний пласт залежно від параметрів опору вугілля зсуву і глибини герметизації свердловини. Встановлено кути і коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя вугілля. Визначено граничні значення тиску нагнітання рідини у викидонебезпечний вугільний пласт при гідроімпульсній дії на нього.

THE ACCOUNT INTERNAL AND AN EXTERNAL FRICTION OF COAL AT CALCULATION OF A HYDROIMPULSE ACTION PARAMETERS

The hydroquench conditions at hydroimpulse action on a coal seam depending on parameters of coal resistance to shear and depths of wells sealing are surveyed. Angles and an external and internal friction factors of coal are established. Boundary values of a discharge pressure of a fluid in an outburst-prone coal seam at a hydroimpulse action on it are defined.

Решение задачи предельного состояния краевой части выбросоопасного угольного пласта до настоящего времени является актуальным и не имеет общепризнанного научно-обоснованного решения. Учитывая сложность структур угольных пластов, сформированных природой, и напряженно – деформированного состояния (НДС) породного массива, выполнить моделирование краевой части пласта в лабораторных условиях практически невозможно. Поэтому задача решается аналитическим путем. При этом в физической модели кроме НДС массива горных пород приходится учитывать зоны разгрузки и повышенного горного давления, которые образуются впереди забоя выработки. Также необходимо иметь в виду, что при нагружении угольного пласта в нем первоначально проявляются пластические деформации, которые при потере сопротивляемости угля сдвигу приводят к его хрупкому разрушению.

Еще более сложной является задача управления состоянием краевой части угольного пласта при нагнетании в него жидкости с целью предотвращения внезапных выбросов угля и газа. Это подтверждается опытом ведения горных работ, когда в условиях больших глубин гидрорыхление краевой части пласта не в полной мере обеспечивает безопасность ведения горных работ. А иногда при проведении подобных мероприятий происходят и газодинамические явления. Основным недостатком этого способа является невозможность управления процессом гидрорыхления при статическом нагнетании жидкости под давлением большим, чем давление гидроразрыва, по причине анизотропии свойств угольного пласта, его слоистости и трещиноватости. Поэтому при гидрорыхлении происходит либо прорыв жидкости по трещинам напластова-

ния, либо гидроотжим пласта или одного из его прослоев. Исследованию этих процессов в условиях больших глубин до настоящего времени не уделялось должного внимания. С одной стороны, математическая модель равновесного состояния краевой части пласта дополняется новыми уравнениями с гидравлическими параметрами статического, гидродинамического или гидроимпульсного режимов воздействия, что в значительной мере усложняет решение данной задачи. С другой стороны, имеется простое техническое решение – применение буровзрывных работ, что позволяет в сложных условиях решить вопрос безопасности ведения горных работ, но не обеспечивает требуемых темпов проведения выработок.

Проведение горно-экспериментальных работ по гидроимпульсному воздействию в забоях подготовительных выработок в качестве противовибросного мероприятия позволило в значительной мере приблизиться к решению вышеотмеченной проблемы.

Модель предельного состояния краевой части угольного пласта при импульсном нагнетании в него жидкости, предложенная в [1, 2], учитывает не только НДС углепородного массива и технологические параметры гидрорыхления угольных пластов (рис. 1), но и физико-механические свойства угля.

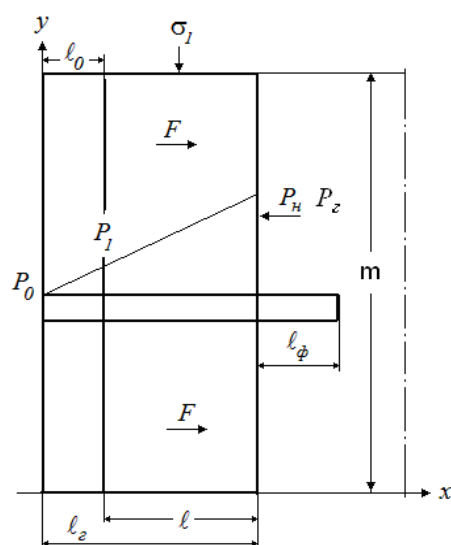


Рис. 1 – Схема краевой части угольного пласта при высоконапорном нагнетании в него жидкости

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: σ_1 – горное давление; P_0 – давление жидкости на поверхности пласта; P_z – давление газа в пласте; P_1 – давление жидкости на кромке пласта; P_n – давление нагнетания жидкости; m – мощность пласта; F – силы трения; l_ϕ – фильтрационная камера; l – зона сопротивления пласта; l_z – глубина герметизации шпура; l_0 – разрушенная часть кромки пласта.

Согласно этой модели гидроотжим или его признаки могут проявиться при условии, если суммарное действие давления газа в угольном пласте и давления жидкости, создаваемого в фильтрационной камере, превысит соответствующие составляющие горного давления и сопротивляемость угля сдви-

гу. Последняя определяется силами внешнего и внутреннего трения, которые, в свою очередь, характеризуются коэффициентами или углами внешнего и внутреннего трения угля. Исходя из этого в [1, 2] определено критическое давление P_n импульсного нагнетания жидкости в угольный пласт, при котором развитие трещинообразования и разрушения угля может привести к проявлению гидроразрыва или гидроотжима прослоев угля:

$$P_n = \frac{1}{m} \int_0^m \left(\frac{2 \left(k + \mu \gamma H \left(1 + \frac{f l_z}{m} \right) \right)}{\cos \rho} \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b^2(y)} \right) + \gamma H \left(1 + \frac{f l_z}{m} \right) \right) dy - P_z, \quad (1)$$

$$\text{где } b(y) = \frac{f \gamma H \left(1 + \frac{f l_z}{m} \right) \left(1 - \frac{2y}{m} \right)}{k + \mu \gamma H \left(1 + \frac{f l_z}{m} \right)};$$

k – сопротивление сдвигу (сцепление); γ – удельный вес горных пород; H – глубина залегания пласта; ρ – угол внутреннего трения; $\mu = \operatorname{tg} \rho$ – коэффициент внутреннего трения; f – коэффициент трения между углем и вмещающими породами.

После интегрирования (1) получим

$$P_n = 2\mu(k + \mu L) + L - \frac{fL}{Q^2 \cos \rho} \left(Q \sqrt{1 - Q^2} + \arcsin Q \right), \quad (2)$$

$$\text{где } L = \gamma H \left(1 + \frac{f l_z}{m} \right) \text{ и } Q = \frac{fL}{k + \mu L}.$$

Из полученного выражения видно, что величина P_n существенным образом зависит от коэффициентов внешнего и внутреннего трения угля. Однако при расчете по нормативным методикам [3] параметров высоконапорного нагнетания жидкости для конкретных горно-геологических условий эти свойства угольных пластов не учитываются. Вместе с тем, из анализа обстоятельств и причин произошедших выбросов при выемке угля после гидрорыхления следует, что все они произошли вследствие различных нарушений принятых параметров гидрорыхления или несоответствия их условиям ведения горных работ в выбросоопасных зонах, в которых гидрообработка пласта оказалась не эффективна для предотвращения газодинамических явлений [4].

Высокая эффективность способа гидроимпульсного воздействия при гид-

рорыхлении угольных пластов и перспектива его широкомасштабного внедрения в производство поставила решение этой задачи на новый уровень. Тем не менее, несмотря на значительный объем исследований, связанных как с изучением свойств материалов, так и с нагнетанием жидкости в угольные пласты, достаточно ясных представлений о корректности методов определения углов или коэффициентов внешнего и внутреннего трения углей и адекватности результатов, получаемых с их помощью, нет до сих пор.

Значения коэффициентов контактного трения различных пар материалов приводятся в многочисленной литературе, однако, необходимо отметить их значительный разброс. Объяснить это можно различием методик [5, 6] и условий определения этих величин (степень параллельности, плоскостности и шероховатости контактирующих поверхностей, величина нормальной нагрузки, нарушение однородности нормальных напряжений по поверхности контакта вследствие образования опрокидывающего момента при приложении к боковому торцу образца сдвигающей силы, смещенной относительно плоскости контактной поверхности, и т.д.).

Сведения о значении углов внутреннего трения материалов сегодня можно найти лишь в немногочисленной литературе, при этом приведенные в ней данные достаточно противоречивы [5, 7]. Объяснить это также можно различием методик и условий определения этих значений (величина нормальной нагрузки, однородность нормальных напряжений по плоскости сдвига, возможности реализации разрушения типа нормального отрыва при разрушении образца сдвигающей силой и т.д.).

Поэтому для корректного определения углов или коэффициентов внешнего или внутреннего трения угля использовались методики [8 - 10], суть которых состояла в определении в условиях стесненной деформации в направлении сжатия зависимости сдвигающего или разрушающего усилия на сдвиг от нормальной сжимающей нагрузки соответственно.

Изготовление образцов в виде прямоугольных параллелепипедов с прямоугольными выступами на одной из их граней, которые используются для установления указанных выше зависимостей, из проб угля выбросоопасного угольного пласта k_2^H гор. 617 м ш/у «Молодогвардейское» ПАО «Краснодон-уголь» (марки Ж) и проведение на них исследований в значительной степени осложняется их слоистостью и трещиноватостью, неоднородностью и низкими прочностными характеристиками. По этой причине регистрация сдвигающего и нормального усилий при определении углов трения проводилась с помощью аппаратно-программного модуля [11], аппаратная часть которого включала упругие элементы с тензометрическими мостами, сигналы от которых подавались на усилитель, затем на аналогово-цифровой преобразователь и запоминающее устройство компьютера. Это обеспечило чувствительность измерений по сжимающей и сдвигающей нагрузкам до 2,5 Н.

Зависимости сдвигающего усилия F_s от нормальной сжимающей нагрузки P для контактирующих пар уголь-уголь, определенные с помощью методики

[7, 8], приведены на рисунке 2. На этом рисунке представлена также линия тренда для экспериментально определенных точек указанной зависимости и ее уравнение в виде $y = bx + y_0$, где, согласно [8], в качестве b следует понимать удвоенный коэффициент внешнего трения: $b = 2f$.

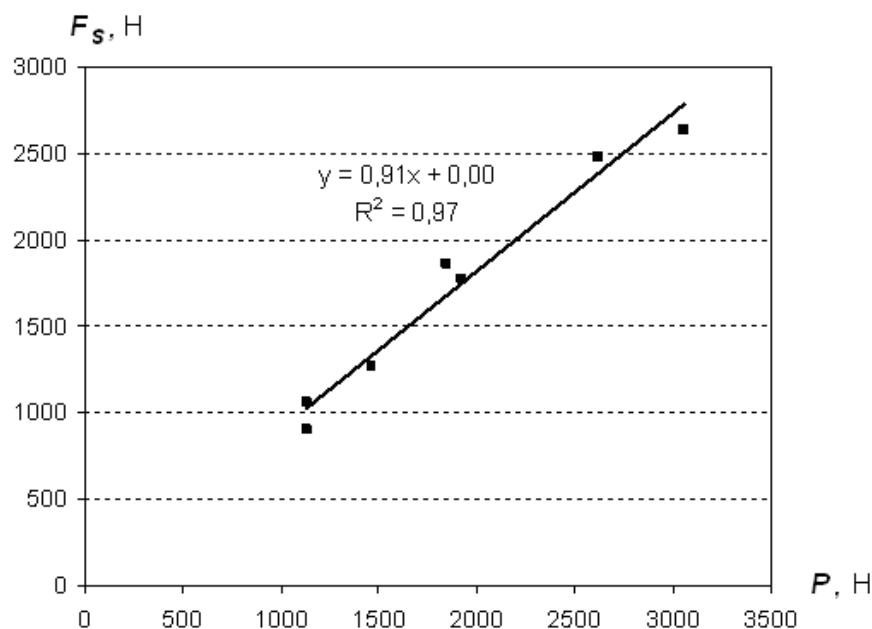


Рис. 2 – Зависимость сдвигающего усилия F_s от нормальной сжимающей нагрузки P для контактирующей пары уголь-уголь

Величина достоверности аппроксимации R^2 при этом была не ниже 0,97. Из этого следует, что в исследуемом диапазоне нагрузок зависимость сдвигающего усилия от нормальной сжимающей нагрузки можно считать линейной. Таким образом, значения коэффициента и угла внешнего трения для контактирующей пары уголь-уголь, составляют $f = 0,45$ и $\rho = 24^\circ$ соответственно.

Результаты определения с помощью методики [7, 9] зависимости разрушающего усилия на сдвиг F_s от нормальной сжимающей нагрузки P для образцов, изготовленных из проб угля, приведены на рисунке 3.

На рисунке 3 также представлена линия тренда и ее уравнение, соответствующие зависимости вида $y = dx + y_0$ где, согласно [8], в качестве d следует понимать сумму коэффициентов внутреннего μ и внешнего трения f : $d = \mu + f$. В данном случае $f = f_f = 0,07$, поскольку для снижения влияния величины внешнего трения на определение коэффициента внутреннего трения между образцом и плитой пресса устанавливались стальной уголок и фторопластовая пластина толщиной 0,1 мм, коэффициент внешнего трения которой относительно стали составлял $f_f = 0,07$.

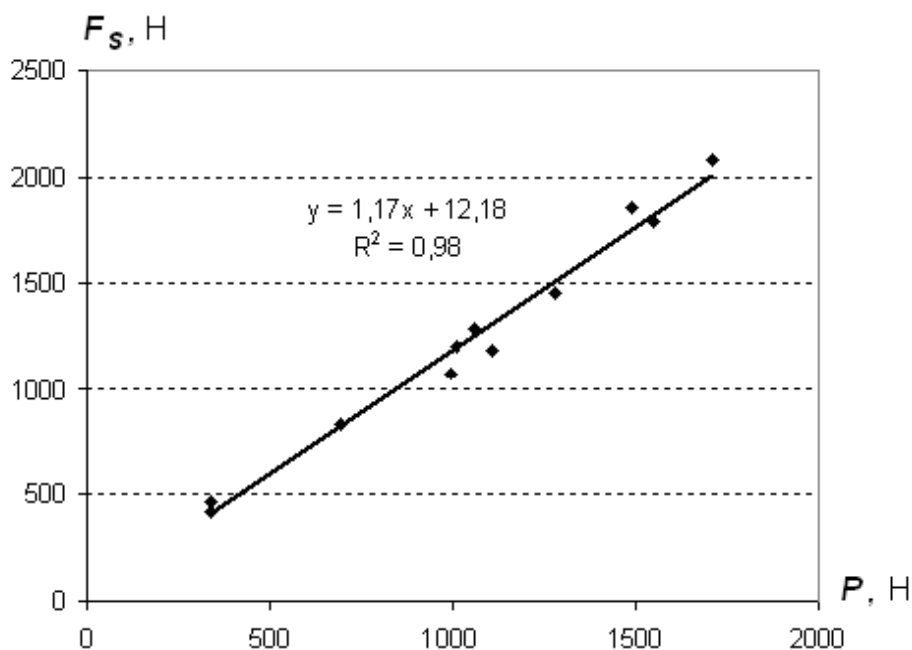


Рис. 3 – Зависимость разрушающего усилия на сдвиг F_s от нормальной сжимающей нагрузки P

Величина достоверности R^2 аппроксимации экспериментальных данных линейной зависимостью, указанной на рисунке 4, составляла 0,98. Это означает, что в исследуемом диапазоне нагрузок зависимость разрушающего сдвигающего усилия от нормальной сжимающей нагрузки также можно считать линейной. Таким образом, значения коэффициента и угла внутреннего трения для исследуемых проб угля составляют $\mu = 1,1$ и $\rho = 48^\circ$ соответственно.

Фотографии некоторых образцов угля после разрушения сдвигом выступов согласно используемой методике приведены на рис. 4.

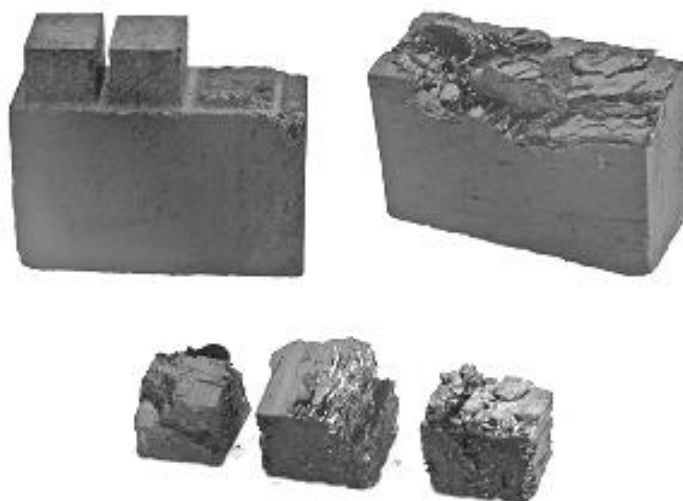


Рис. 4 – Образцы угля из выбросоопасного пласта k_2^H гор. 617 м ш/у «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь» после разрушения их выступов сдвигом

На основании установленных значений коэффициентов и углов внутреннего и внешнего трения угля выбросоопасного пласта k_2^H гор. 617 м ш/у «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь» по формуле (2) выполнены расчеты критического давления жидкости P_n в фильтрационной камере при гидроимпульсном воздействии в зависимости от глубины герметизации скважины (рис. 5).

В расчетах приняты следующие значения характеристик угольного пласта и параметров гидрорыхления: $H = 720$ м; $m = 1,32$ м; $k = 1$ МПа; $\gamma = 26,5$ кН/м³; $P_2 = 2$ МПа; глубина скважин для нагнетания жидкости от 6,0 м до 8,0 м; $l_0 = 0,1$ м; $l_2 = 2,5 \dots 5,5$ м. Результаты этих расчетов представлены на рис. 5. На этом рисунке представлена также линия тренда для расчетных точек указанной зависимости и ее уравнение в виде $y = bx + y_0$. Величина достоверности аппроксимации составляла при этом $R^2 = 1,00$. Из этого следует, что в рассмотренном диапазоне значений l_2 зависимость критического давления P_n импульсного нагнетания жидкости от глубины герметизации скважин l_2 является линейной и для выше принятых значениях величин γ , H , m , k , f , μ , ρ и P_2 выражается формулой $P_n = 1,60l_2 + 1,70$, где $[P_n] =$ МПа и $[l_2] =$ м.

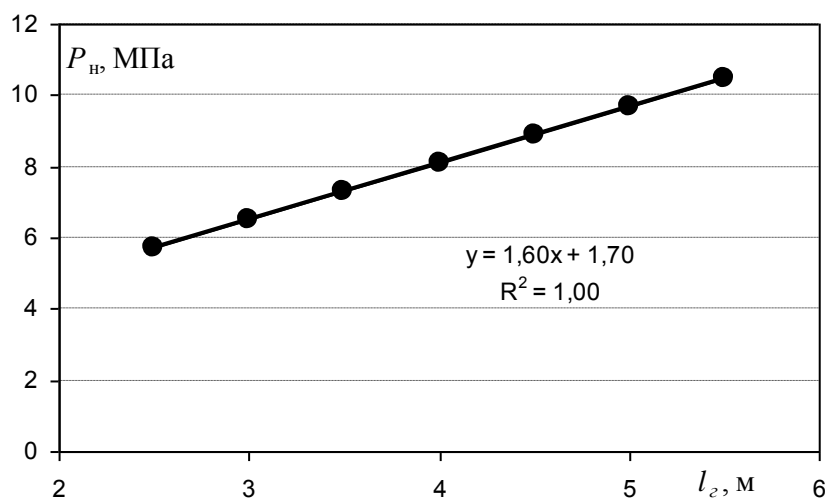


Рис. 5 – Зависимость критического давления нагнетания жидкости P_n в фильтрационной камере скважин от глубины ее герметизации l_2 при гидроимпульсном воздействии

Результаты выполненных расчетов использовались при проведении горноэкспериментальных работ по гидроимпульсному воздействию в забое 33-го орловского конвейерного ходка пласта k_2^H гор. 617 м ш/у «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь».

Отличительной особенностью и преимуществом использованных методик определения углов внешнего и внутреннего трения является то, что при проведении исследований создаются условия, аналогичные состоянию угольного

пласта, находящегося в условиях сжатия между породами кровли и почвы. Поэтому применение полученных результатов сопротивляемости угля сдвигу в расчетах параметров гидроимпульсного воздействия при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов в конкретных горно-геологических условиях в значительной мере повышает надежность способа и уровень безопасности ведения горных работ. При этом установление адекватных значений углов внутреннего и внешнего трения угля позволяет более достоверно рассчитывать давление гидроотжима, которое является граничным условием при определении предельного состояния краевой части выбросоопасного угольного пласта при его гидрорыхлении для различных глубин герметизации скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сравнительная оценка моделей гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов / Л.М. Васильев, В.В. Зберовский, А.А. Ангеловский [и др.] // Импульсные процессы в механике сплошных сред: материалы международной научной конференции. - Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. - С.142 - 145.
2. Зберовский В.В. Математическая модель предельного состояния угольного пласта при нагнетании жидкости / В.В. Зберовский, А.В. Пазынич, Ю.Е. Поляков // Материалы конференции «Математические проблемы технической механики 2011».- Днепропетровск, Днепродзержинск: ИГТМ НАНУ, 2011.- С. 197-199.
3. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям / Стандарт Минуглепрома Украины СОУ 10.1.001740088-2005. – Киев: Минуглепром Украины, 2005. – 225 с.
4. Закономерности проявления выбросоопасности при гидрорыхлении угольных пластов. / А.А. Рубинский, Э.И. Тимофеев, М.В. Чурадзе [и др.] // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сб. научн. трудов МакНИИ. - Макеевка-Донбасс: 2005. – С. 292-298.
5. Барон Л.И. Характеристики трения горных пород / Л.И. Барон. - М.: Наука, 1967. - 207с.
6. Капранов И.В. Теоретическая механика: Ч.1. Статика. / И.В. Капранов // Учеб. пособ. - М.:РГОТУПС, 2001.- 81с.
7. Порпевский А.К. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива / А.К. Порпевский, Г.А. Катков. - М.: Московский гос. открытый ун-т, 2004. – 120 с.
8. Костандов Ю.А. Определение коэффициентов внешнего и внутреннего трения материалов / Ю.А. Костандов // Заводская лаборатория. – 2011. - №2. - С. 56-59.
9. Пат. 45121 Украина, Способ определения коэффициента трения / Ю.А. Костандов; заявитель и патентообладатель Таврический национальный университет - №200905365; заявлено 28.05.2009.; опубл. 26.10.2009, Бюл.№20.
10. Пат. 48513 Украина, Способ определения коэффициента внутреннего трения / Ю.А. Костандов; заявитель и патентообладатель Таврический национальный университет - №200908705; заявлено 19.08.2009.; опубл. 25.03.2010, Бюл.№6.
11. Костандов Ю.А., Медведев В.С. Исследование предельного состояния хрупких тел с трещинами при одноосном сжатии / Ю.А. Костандов // Заводская лаборатория. – 2011. - №3. - С. 54-57.