

УДК 622.831.325

Агаев Р.А., канд. техн. наук,
Андреев С.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Макеев С.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Рыжов Г.А., магистр,
Софийский К.К., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины)

БЛОКИРОВАНИЕ МЕТАНА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ РАСТВОРАМИ ПОЛИМЕРОВ

Агаев Р.А., канд. техн. наук,
Андреев С.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. співр.,
Макеев С.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. співр.,
Рижов Г.О., магистр,
Софійський К.К., д-р техн. наук, професор
(ІГТМ НАН України)

БЛОКУВАННЯ МЕТАНУ В ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ РОЗЧИНАМИ ПОЛІМЕРІВ

Agaev R.A., Ph.D. (Tech.),
Andreev S.Yu., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Makeev S.YU., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Ryzhov G.A., M.S (Tech),
Sofiyskiy K.K., D. Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine)

METHANE BLOCKING IN THE COAL SEAM BY SOLUTIONS OF POLYMERS

Аннотация. Целью статьи является обоснование механизма проникновения полимера в углепородный массив и взаимодействия его с углем, что позволит усовершенствовать способ проведения подготовительных выработок по выбросоопасным угольным пластам с использованием физико-химической обработки (ФХО) полимером для повышения безопасности и эффективности горных работ. Ранее было показано, что использование физико-химического воздействия позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием углепородного массива, однако остается проблема выхода метана в выработанное пространство очистных и подготовительных выработок. Это обуславливает актуальность проводимых исследований. Для решения этой проблемы авторами предлагается при ФХО массива применять растворы полимеров, которые, распространяясь под большим давлением по трещинам и порам, созданным предварительно гидродинамическим воздействием, образуют гелеобразные композиции, блокирующие метан. Установлено, что максимального эффекта блокировки метана в порах можно достичь при условии хемосорбирования адсорбционного слоя на поверхности угля. Это приводит к образованию твердого полимерного слоя, способного блокировать метан в порах. Научная новизна результатов заключается в обосновании физической сущности и механизма обработки метаноносного угольного пласта полимерными композициями, при кото-

ром смачивание поверхности угля растворами высокомолекулярных соединений происходит по механизму распределения макромолекул на границе раздела фаз с образованием сплошного, плотно упакованного адсорбционного слоя.

Приведенные результаты могут быть использованы при разработке способа проведения подготовительных выработок по выбросоопасным угольным пластам с использованием ФХО полимером с целью предотвращения газодинамических явлений путем блокирования метана на безопасном расстоянии от забоя и проектного контура выработки.

Ключевые слова: газодинамическое явление, физико-химическая обработка, полимерная композиция, неньютоновская жидкость

Введение

В связи с ухудшением горно-геологических условий при углублении шахт, а, следовательно, и более участившимися изменениями состояния горного массива негативного характера, сопутствующими работе шахтеров, на первый план выходят способы борьбы с газодинамическими явлениями, имеющие дополнительный запас разнообразных вариантов использования [1]. К таким вариантам относится требующий дальнейшего развития физико-химический способ обработки (ФХО) массива различными химическими составами с не до конца раскрытым и не достаточно реализованным потенциалом [2-4]. Спектр его применения лежит далеко за пределами узких возможностей использования одностадийных и однокомпонентных воздействий на углепородную среду, охватывая многокомпонентную сферу воздействий прохождением рационально возможных стадий инъецирования жидкости в пласт, а также совместное проведение ФХО с другими способами воздействия [5].

Важная роль здесь отводится выбору химических составов, как первично используемых, так и не потерявших своих универсальных свойств при взаимодействии с массивом и способных быть не менее эффективно задействованными в затруднительных условиях.

Особое место, если не главное, в ряду когда-либо используемых при ФХСО реагентов занимают полимерные композиции. Если раньше однозначно предполагалось, что при нагнетании полимер оттесняет метан вглубь массива и, затвердевая, блокирует его в трещиновато-пористой структуре угольного пласта, то дополнительные исследования позволяют интерпретировать данный процесс в несколько ином плане. Несмотря на большую вязкость полимера, чем воды, он способен стремительнее продвигаться по поровому пространству и быстрее вбирать в себя газ [Gilman J.R., 1985], [Jonson A.V., 1991]. Этому вопросу не всегда уделялось должное внимание. Даже при концентрациях органических веществ, характерных для природных вод, можно увеличивать проходимость газовых пузырьков и изменять их адсорбцию на твердой поверхности [6].

Сказанное не будет казаться противоречивым, если учитывать, что полимерные композиции относятся к так называемым неньютоновским жидкостям, отличающимся своей вязкостью, которая зависит от градиента скорости их распространения. Со временем вязкость отдельных неньютоновских жидкостей может изменяться [Уилкинсон У.Л., 1964]. И тогда не совсем понятно

в жидком или твердом состоянии находятся они в определенный момент времени.

В общем случае классификация реологических моделей жидкости производится по зависимости вязких напряжений от скорости сдвига (градиента скорости) $\gamma = dv/dz$, где v – скорость течения. В этой классификации жидкости подразделяются на три вида: ньютоновская жидкость, степенная жидкость и Бингамовская жидкость [7].

Механизм действия неньютоновских жидкостей

Ньютоновская жидкость – вязкая жидкость, подчиняющаяся при своём течении закону вязкого трения Ньютона. Для прямолинейного ламинарного течения этот закон устанавливает наличие линейной зависимости между касательными напряжениями τ в плоскостях соприкосновения слоев жидкости и производной от скорости течения v по направлению нормали n к этим плоскостям, т.е. $\tau = \eta dv/dn$, где η – динамический коэффициент вязкости. В общем случае пространственного течения для ньютоновской жидкости имеет место линейная зависимость между тензорами напряжений и скоростей деформаций ($\sigma = \alpha\gamma$). Жидкости, для которых указанная зависимость является не линейной, а степенной ($\sigma = \alpha\gamma^n$), называются неньютоновскими или степенными. К ним относится ряд суспензий и растворов полимеров. Иногда их называют псевдопластическими жидкостями, соответствующими условию $d\eta/d\gamma < 0$, в отличие от случая дилатантных жидкостей, где $d\eta/d\gamma > 0$.

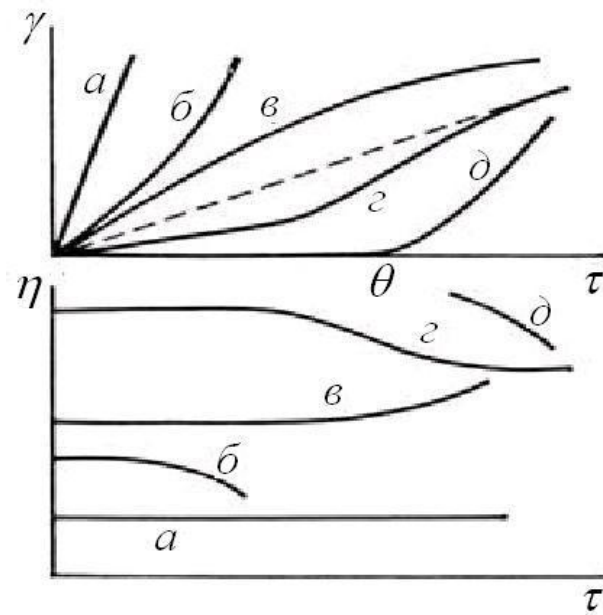
Кривые текучести и зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига для ньютоновской и степенной (неньютоновской) жидкостей приведены на рис. 1 [Уилкинсон У.Л., 1964].

В отличие от ньютоновской жидкости (рис.1, а), при простом чистом сдвиге диаграмма зависимости скорости сдвига γ приложенного касательного напряжения τ для неньютоновских жидкостей нелинейна. Течение неньютоновских жидкостей, в отличие от вязкопластичного тела, происходит при любых, в т.ч. и при достаточно малых, напряжениях. Эффективная вязкость $\eta = \tau/\gamma$ неньютоновских жидкостей в отличие от эффективной вязкости ньютоновской жидкости не постоянна, а в каких-то интервалах τ и γ зависит от приложенного напряжения. Эффект изменения (обычно снижения) эффективной вязкости η с ростом скорости сдвига γ называется аномалией вязкости. В общем случае изотропной тензорно-линейной жидкости зависимость между девиаторами напряжений τ и скоростей деформации D записывается в виде

$$\tau(D) = j_1 D + j_2 D^2, \quad (1)$$

где j_1 и j_2 – скалярные функции трёх главных инвариантов тензора скоростей деформации.

Для ньютоновской жидкости $j_1 = 2h$ (h – коэффициент вязкости), $j_2 = 0$.



a – диаграммы для ньютоновской жидкости; $б, г$ – диаграммы для неньютоновских жидкостей, у которых η снижается с ростом γ и τ ; $в$ – диаграмма для неньютоновской жидкости, у которой η повышается с ростом γ и τ ; $д$ – диаграмма для вязкопластического тела с пределом текучести q .

Рисунок 1 – Кривые текучести γ - τ и зависимости эффективной вязкости η от напряжения сдвига τ

С целью выяснения эффективности применения физико-химических композиций с разными минеральными и полимерными матрицами и разными наполнителями в зависимости от технологических параметров обычно анализируют эффективную вязкость η при постоянной скорости сдвиговых деформаций γ с помощью степенного закона Оствальда-Вилля [7], который путем логарифмирования можно привести к линейному виду

$$\ln \eta = \ln K + m \cdot \ln \gamma \quad (2)$$

где K – параметр реологической модели.

При выборе состава раствора анализируют параметр $m < 0$ – темп разрушения структурированной неньютоновской жидкости при увеличении скорости сдвиговых деформаций γ .

В отличие от общих вязкоупругих жидкостей (наследственных сред или сред с памятью) поведение неньютоновской жидкости в текущий момент времени не зависит от предшествующей истории напряжённо-деформированного состояния. В этом проявляется отличие ее свойств от тиксотропных и реопексных жидкостей, у которых соответственно эффективная вязкость понижается или повышается в процессе механического воздействия на систему. Свойствами неньютоновской жидкости обладают структурированные дисперсные системы (суспензии, эмульсии), растворы и расплавы некоторых полимеров, течения грязи, шламов и др.

С учетом вышеизложенного и анализа реологических моделей, классификация жидкостей, которые могут применяться для воздействия на угольные пласты с целью управления их напряженно-деформированным состоянием, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация реологических моделей жидкостей, применяемых для обработки углепородного массива

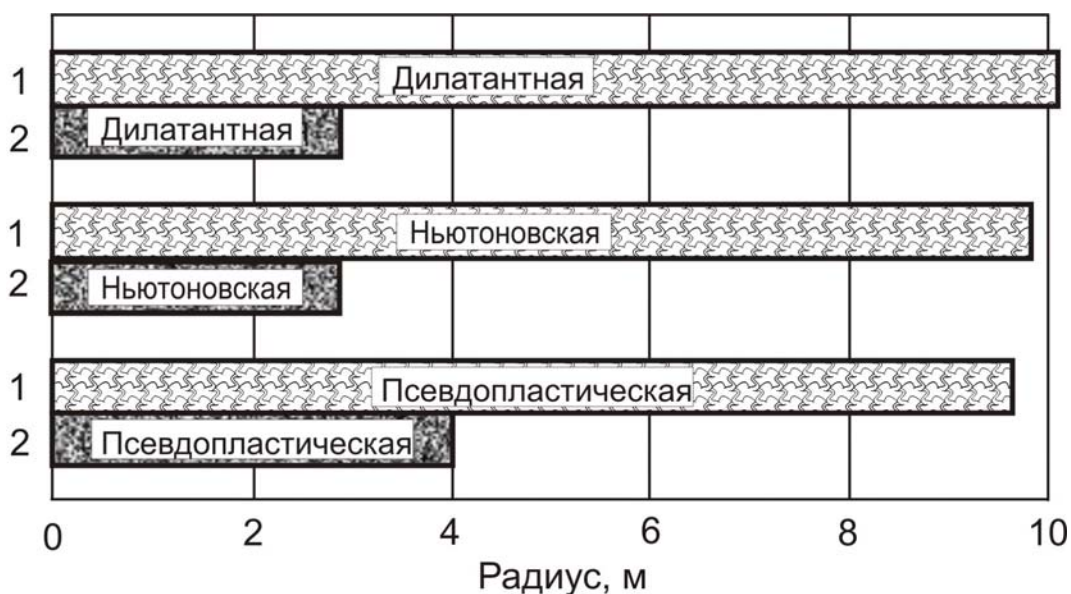
Тип жидкости	Описание реологической модели	Наименование жидкостей
ньютоновские жидкости	$\sigma = \alpha\gamma$	вода, спирты, кислоты, глицерин, водные растворы метиламина, солей, ПАВ
вязкопластические (бингамовские) жидкости	$\sigma = \sigma_0 + \alpha\gamma, \text{ при } \gamma > 0$ $\sigma = -\sigma_0 + \alpha\gamma, \text{ при } \gamma < 0$	высокопарафинистые нефти, глинистые растворы, структурированные жидкости, масляные краски
псевдопластические жидкости	$\sigma = \alpha\gamma^n, n < 1$ $d\eta/d\gamma < 0$	растворы полимеров (лигносульфонаты, карбамидо-мочевино-формальдегидные смолы, щелочные растворы силикатов)
дилатантные жидкости	$\sigma = \alpha\gamma^n, n > 1$ $d\eta/d\gamma > 0$	высококонцентрированные суспензии, органозоли
тиксотропные и реопетические жидкости	$\gamma = const$ $d\sigma/dt < 0$ $d\eta/dt < 0$	буровые глинистые растворы, краски, высокосмолистые, высокопарафинистые нефти и другие дисперсные системы

Применение неньютоновских жидкостей для воздействия на угольные пласты

Для воздействия на угольные пласты с различной проницаемостью с практической точки зрения наиболее важно конечное распределение радиуса проникновения жидкости в массив. На рисунке 2 изображены три варианта глубины проникновения раствора (для дилатантного, ньютоновского и псевдопластического реагента) в пласты с различной проницаемостью при идентичных условиях [8]. Объем закачки во всех трех случаях одинаков, но время закачки разное. Из рис. 2 видно, что в низкопроницаемый пласт меньше всего попадает дилатантного реагента, а больше – псевдопластического.

При ФХВ интрига заключается в том: сможет ли полимер в различных горно-геологических условиях только своими силами, затвердевая, блокировать метан или же для гарантии нужно дополнительно использовать крепитель – тщательно подобранную составляющую, смешиваемую с ним непосредственно перед закачкой в массив с расчетом последующего затвердения в нужный момент времени уже в трещиновато-пористой структуре угля.

Если не учитывать неньютоновские свойства, то к факторам, благоприятствующим одностадийной и однокомпонентной ФХО с использованием полимера без добавок, относятся:



1 – высокопроницаемый пласт; 2 – низкопроницаемый пласт

Рисунок 2 – Сопоставление глубин проникновения реагентов с различной реологией в угольные пласты различной проницаемости

– смачивание поверхности угля водными растворами высокомолекулярных соединений должно приводить к распределению макромолекул на границе раздела жидкой и твердой фаз с образованием сплошного, плотно упакованного адсорбционного слоя;

– адсорбция на гидрофильных или на гидрофобных центрах, которой способствуют только молекулы органических веществ, имеющих гидрофильные и гидрофобные группы;

– полифункциональность водорастворимых полимеров и смол, благодаря которой молекулы закрепляются сразу в нескольких местах на поверхности угля;

– закрепление огромной макромолекулы полимера в нескольких местах на активных участках поверхности угля, что экранирует не только гидрофильные, но и гидрофобные поверхности;

– дальнейшее нахождение метана в заблокированном состоянии зависит не от толщины полимерного слоя, а от величины адгезии адсорбционного слоя на границе раздела фаз, т.е. от величины энергии связи уголь – полимер;

– эффект блокирования газа полимерным раствором, переходящим в твердое состояние после окончания процесса нагнетания проявляется в гораздо большей степени с точки зрения надежности и долговременности действия по сравнению с водой и другими жидкостями.

В то же время степень блокирования метана полимерным раствором во многом зависит от проникающей способности последнего, а, следовательно, от вида раствора и его концентрации. Это предъявляет к жидкости для физико-химического воздействия на угольные пласты специфические не менее важные требования, удовлетворение которых как раз и способствует поведению полимера как неньютоновской жидкости.

Здесь было бы непростительно не использовать неоспоримое преимущество способности полимерной композиции, подобно неньютоновской жидкости, приходить в подвижное состояние при различных величинах приложенного напряжения [Бибик Е.Е., 1981]. Это позволяет варьировать величиной давления даже при возможных сбоях в ритме работы технологической схемы нагнетания в угольный пласт раствора без ущерба для его химических превращений. Главное требование для сохранения свойств неньютоновской жидкости – непрерывность воздействия. С другой стороны, исследованиями не подтверждена правомерность сохранения этих свойств для каналов (трещин и пор) любого диаметра, учитывая непостоянство эффективной вязкости в зависимости от величины приложенных напряжений в определенных интервалах γ и τ . Причем на этот процесс в текущий момент времени не влияет предшествующая история напряжённо-деформированного состояния [Астарита Дж., 1978]. Помимо данных закономерностей поведения полимера, как разновидности неньютоновской жидкости, благоприятствующих достаточно глубокому ее проникновению в трещиновато-пористую структуру обрабатываемого массива, раствор постепенно переходит ещё и в категорию газированной жидкости, вбирающей в себя по мере прохождения по поровому пространству горной породы максимально возможное количество метана. Таким образом, приоритетным параметром описанного воздействия является вязкость полимерной композиции, увязывающая воедино, остальные характеристики рассмотренного процесса.

При фильтрации газированной жидкости обычно считается, что для её жидкостной и газовой фаз можно записать уравнение Дарси в виде [Буевич Ю.А., 1967]:

$$m \cdot S_j \cdot \omega_j = - \frac{k_0 \cdot K_j}{\mu_j} \nabla P, \quad j = 1, 2, \quad (3)$$

где k_0 – абсолютная проницаемость пористой среды; K_j – относительная (для жидкой и газовой фаз фильтрующегося флюида) проницаемость; m – пористость среды; S_j – насыщенность (газовой и жидкой фазами); μ_j – динамическая вязкость (газовой и жидкой фаз); ω_j – скорость фильтрации (для газовой и жидкой фаз); ∇P – градиент внутрипластового давления; j – индексы, обозначающие газовую ($j=1$) и жидкую ($j=2$) фазы фильтрующегося флюида.

Уравнение (1) соответствует такому течению в пористой среде, когда газовая и жидкостная фазы фильтрующегося флюида практически равнозначны. Тогда можно представить, что движение жидкости или газа происходит в некоторой системе непрерывных каналов, заполненных ими. Однако, если содержание одной из фаз мало, то представление о равнозначности этих составляющих, зафиксированное в уравнении (1), перестает быть верным. В этом случае пористая среда занята в основном жидкостью с изолированными газовыми пузырьками (зародышами).

Таким образом, может возникнуть ситуация, когда давление в газированной жидкости будет выше давления насыщения и она обретёт признаки

гомогенного и несжимаемого вещества, эффективная проницаемость для которой определяется способностью проскальзывания. При наличии проскальзывания неньютоновская жидкость подчиняется степенному закону, что обуславливает аномальный рост ее расхода, необходимый для дальнейшего продвижения в пласт.

По нашему мнению подобное свойственно для газообильных угольных пластов, так как в малогазоносных пластах метана недостаточно, для насыщения им полимера, что позволяет держать газожидкостную систему в равновесии и довести процесс нагнетания раствора до намеченной глубины проникновения в трещиновато-пористую систему угля вплоть до затвердевания реагентов в требуемый срок.

В газоносных угольных пластах, наоборот, насыщенная до предела метаном газированная жидкость на фронте нагнетания встречает на своём пути препятствие в виде того же сжимаемого метана, количество которого уже выше нормы для её наполнения, но вполне достаточно для противодействия изнутри, с учетом постоянной подпитки его сорбированным газом. Это не позволяет полимеру затвердевать в нужный момент времени. Необходимо дополнительное усилие для перехода жидкости из каналов одного диаметра в другие. Причем, по нашему мнению, при схлопывании пузырьков газа независимо от того, на границе перехода из пор меньшего диаметра к большим или, наоборот, находится нагнетаемый раствор, может быть спровоцирован процесс кавитации, в результате которого образуется ударная волна, продвигающая полимер дальше вглубь массива. Кавитация будет эффективней при использовании гидродинамического режима нагнетания полимера [5], при котором создаются дополнительные благоприятные условия для снижения выбросоопасности за счет увеличения зоны влияния способа. Особенно это актуально для зон геологических нарушений с непредсказуемым беспорядочным расположением в них дефектных пор и трещин и с печально известной репутацией их приуроченности к большинству происходящих внезапных выбросов угля и газа.

Согласно теоретическим положениям адсорбции полимеров из растворов, скорость и количество адсорбированного вещества связаны со смачиваемостью адсорбента, свойствами растворителя и растворенного полимера, т.е. если растворитель хуже смачивает поверхность адсорбента, чем растворенный полимер, то адсорбция в системе имеет положительный характер. Это положение дает преимущественное право сказать, что рабочие растворы для физико-химического воздействия на угольный пласт должны быть приготовлены на основе воды, как растворителя, плохо смачивающего уголь.

Дальнейшее нахождение метана в заблокированном состоянии зависит не от толщины полимерного слоя, а от величины адгезии адсорбционного слоя на границе раздела фаз, т.е. от величины энергии связи уголь - полимер. Следовательно, максимального эффекта блокировки метана в порах можно достичь при условии хемосорбирования адсорбционного слоя на поверхности угля. Это приводит к образованию твердого полимерного слоя, способного блокировать метан в порах.

Кроме того, та часть полимерной композиции, которая осталась не адсорбированной на поверхности трещин, проявляя свойства неньютоновской жидкости, мгновенно меняет фазовое состояние с жидкого на твердое при резком повышении давления в момент газодинамического явления, препятствуя тем самым его дальнейшему развитию.

Выводы

Вышесказанное позволяет объяснить большую по сравнению с водой проникающую способность полимерных композиций в трещиновато-пористую структуру углепородного массива и более интенсивное впитывание газа. В призабойной зоне пласта, разгруженной от горного давления, в системе образовавшихся макротрещин и крупных пор достаточно много свободного метана для насыщения им раствора любой вязкости. Значительно труднее пузырькам газа высвободиться обратно. Темпы насыщения полимера газом опережают темпы снижения вязкости тем же метаном. На этой стадии воздействия давления нагнетания вполне хватает для продвижения в пласт растворов различной вязкости. Но при попадании в зону сложного напряженного состояния с сомкнутой системой микротрещин и пор необходимо дополнительное усилие для перехода жидкости из системы более широких каналов в узкие. Полимер в отличие от воды обладает достаточным количеством как бы вклеившихся в него пузырьков воздуха и газа, чтобы при схлопывании на границе перехода крупных трещин в мелкие спровоцировать процесс кавитации, в результате которого образуется ударная волна, способствующая расширению трещин и дальнейшему продвижению полимера вглубь массива.

Таким образом, в результате обоснования механизма проникновения полимера в углепородный массив и взаимодействия его с углем представляется возможным усовершенствовать способ проведения подготовительных выработок по выбросоопасным угольным пластам путем гидродинамического воздействия с последующей ФХО их полимером, как средством блокирования метана на безопасном расстоянии от забоя и проектного контура выработки, что снижает вероятность развязывания газодинамического явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление аэрологическими и геомеханическими процессами в угольных шахтах / А.Ф. Булат, К.К. Софийский, Б.В. Бокий [и др.]. – Мариуполь: ООО «Східний видавничий дім», 2016. – 300 с.
2. Некоторые особенности протекания и предотвращения газодинамических явлений / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев, Г.А. Рыжов // Уголь Украины. – 2015. – № 7-8. – С. 17-21.
3. Феноменологическая модель генезиса динамических явлений в шахтах / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев, Г.А. Рыжов // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції 18 травня 2011 р. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 11-16.
4. Макеев, С.Ю. Снижение выбросоопасности горного массива путем увеличения однородности его трещиновато-блочной структуры / С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев, Г.А. Рыжов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепр, 2016. – Вып. 127. – С. 67-76.
5. Софийский, К.К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля / К.К. Софийский, А.П. Калфакчян, Е.А. Воробьев. – М.: Недра, 1994. – 192 с.

6. Вэнь Байхун. Физическое моделирование перемещения пузырьков газа в пористых системах и влияние органических веществ на этот процесс / Байхун Вэнь, О.Ф. Путиков // Сб. тр. мол. ученых СПбГГИ. – 1998. – № 2. – С.5-10.

7. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм. – М.: Колосс, 2003. – 311 с.

8. Федоров, К.М. Фильтрация нелинейно-вязких реагентов в призабойной зоне скважины / К.М. Федоров, А.О. Ярославов // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий. – М.: Радио и связь, 2003. – Т.1. – Ч. 3. – С. 51-52.

REFERENCES

1. Bulat A.F., Sofijskiy K.K., Bokiyy B.V., Sheyko A.V., Agaev.R.A. and Tinina S.V. (2016), *Upravleniye aerologicheskimi i geomekhanicheskimi processami v ugolnykh shakhtakh* [Management of upper-air and geomechanical processes in coal mines], ООО «Skhidny vydavnychy dim», Mariupol, UA.

2. Bulat A.F., Makeev S.Yu., Andreev S.Yu. and Ryzhov G.A. (2015), “Some features of flowing and prevention of the gas-dynamic phenomena“, *Coal of Ukraine*, no 7-8, pp. 17-21.

3. Bulat, A.F., Makeev, S.Yu., Andreev, S.Yu. and Ryzhov, G.A. (2011), “A phenomenological model of the dynamic phenomena genesis is in mines”, *Pidzemni katastrofy: modeli, prognoz, zapobigannya* [Underground catastrophes: models, prognosis, prevention], *II Mizhnarodna Konferentsiya 18 travnya 2011 r.* [II International Conference 18 of May 2011], Dnepropetrovsk, UA, 18.05.2011, pp. 11-16.

4. Makeev, S.Yu., Andreev, S.Yu. and Ryzhov, G.A. (2016), “Theoretical consideration of the plasma energy transfer to the rock mass”, *Geo-Technical Mechanics*, no 127, pp. 67-76

5. Sofijskiy, K.K., Kalfakchiyan A.P. and Vorobyov, Ye.A. (1994), *Netraditsionnye sposoby predotvrashcheniya vybrosov i dobychi uglya* [Innovative ways to prevent outbursts and coal mining], Nedra, Moscow, RU..

6. Ven Baykhun and Putikov, O.F. (1998), “Physical modeling of moving gas bubbles in porous systems and the influence of organic substances on the process”, *Sbornik trudov molodykh uchenykh*, SPbSMI, no 2, pp. 5-10.

7. Shramm, G. (2003), *Osnovy prakticheskoy reologii im reometrii* [The basics of practical rheology and rheometry], Koloss, Moscow, RU.

8. Fedorov, K.M. and Jaroslavov, A.O. (2003), “Filtering nonlinear viscous reagents in the bottomhole zone of the well”, *System problems of quality, mathematical modelling, information and electronic technologies*, vol. 1, no 3, pp. 51-52.

Об авторах

Агаев Руслан Азугулуевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе проблем технологии подземной разработки угольных месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепро, Украина, igtm16@yandex.ua

Андреев Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, smakeev@ukr.net

Макеев Сергей Юрьевич, 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), Днепр, Украина, smakeev@ukr.net

Рыжов Геннадий Александрович, магистр, 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), Днепр, Украина, rga53@mail.ru

Софийский Константин Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом проблем технологии подземной разработки угольных месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, igtm16@yandex.ua

About the authors

Agaev Ruslan Aguguluevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Department of Underground Coal Mining Technology, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, igtm16@yandex.ua

Andreev Sergey Jurievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Principal Engineer in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, smakeev@ukr.net

Makeev Sergey Jurievich, 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 Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, smakeev@ukr.net

Ryzhov Gennadiy Alexandrovich, Master of Science (M.S), Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, rga53@mail.ru

Sofiyskiy Konstantin Konstantinovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Underground Coal Mining Technology, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, igtm16@yandex.ua

Анотація. Метою статті є обґрунтування механізму проникнення полімеру в вуглепородний масив і взаємодії його з вугіллям, що дозволить удосконалити спосіб проведення підготовчих виробок по викидонебезпечним вугільним пластам з використанням фізико-хімічної обробки (ФХО) полімером для підвищення безпеки та ефективності гірничих робіт. Раніше було показано, що використання фізико-хімічної дії дозволяє управляти напружено-деформованим станом вуглепородного масиву, однак залишається проблема виходу метану у вироблений простір очисних та підготовчих виробок. Це обумовлює актуальність проведених досліджень. Для вирішення цієї проблеми авторами пропонується при ФХО масиву застосовувати розчини полімерів, які, поширюючись під великим тиском по тріщинах і порах, створеним попередньо гідродинамічним впливом, утворюють гелевидні композиції, які блокують метан. Встановлено, що максимального ефекту блокування метану в порах можна досягти за умови хемосорбівування адсорбційного шару на поверхні вугілля. Це призводить до утворення твердого полімерного шару, здатного блокувати метан в порах. Наукова новизна результатів полягає в обґрунтуванні фізичної сутності та механізму обробки метанозного вугільного пласта полімерними композиціями, при якому змочування поверхні вугілля розчинами високомолекулярних сполук відбувається за механізмом розподілу макромолекул на межі розділу фаз з утворенням суцільного, щільно упакованого адсорбційного шару. Наведені результати можуть бути використані при розробці способу проведення підготовчих виробок по викидонебезпечним вугільним пластам з використанням ФХО полімером з метою запобігання газодинамічним явищам шляхом блокування метану на безпечній відстані від вибою і проектного контуру виробки.

Ключові слова: газодинамічне явище, фізико-хімічна обробка, полімерна композиція, неньютоновська рідина

Annotation. Objective of the work is to substantiate mechanism of polymer penetration into the coal mass and its interaction with the coal, and to improve method of driving preparatory roadways in the prone-to-outburst coal seams through the using physicochemical treatment (PCT) by polymer in order to improve safety and efficiency of mining operations. Previously, it was shown that physicochemical action allowed to control stress-strain state of coal-rock mass; however, problem of methane escaping into the worked-out area of the goaf and preparatory roadways was still

unsolved, hence, making the further researches a strong business case. In order to solve this problem, the authors propose to use polymer solutions during the PCT, which, being under the great pressure, penetrate into the cracks and pores created beforehand by the hydrodynamic effect and form a gel-like composition, which blocks methane. It is established that maximum blocking of methane in the pores can be achieved under condition of hemo sorption of the adsorbed layer on the surface of the coal. This action leads to formation of a solid polymer layer, which is able to block methane in the pores.

Scientific novelty of the results lies in explanation of physical essence and mechanism of processing methane-bearing coal seam by polymeric compositions, at which coal surface is wetted by the high-molecular compounds according to the mechanism of macromolecule distribution on the interphase boundary with formation of solid, densely packed adsorption layer.

The results can be used while developing methods for driving preparatory roadways in the prone-to-outburst coal seams with the help of PCT by polymer in order to prevent gas-dynamic phenomena and to keep methane at a safe distance from the face and the design contour of roadway.

Keywords: gas-dynamic phenomenon, physical and chemical treatment, polymer composition, non-Newtonian fluid

Статья поступила в редакцию 29.08.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.А. Курносковым