

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.67.72.001

УДК 622.831.31

© А.В. Шадрин, 2024

А.В. ШАДРИН

д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,
г. Кемерово
e-mail: avsh-357@mail.ru



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМОСТИ ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ УСЛОВИЙ СПОСОБОВ ГИДРООБРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Предложен алгоритм определения наиболее приемлемого для конкретных условий способа гидрообработки угольного пласта и его оптимальных технологических, (характеризующих расположение скважин и их параметры) и гидравлических (температура и давление нагнетания насосной установки) параметров по результатам контроля интенсивности растущих трещин под действием нагнетаемой жидкости акустико-эмиссионным методом. Рассматриваемыми способами гидрообработки явились регламентируемые действующими нормативными документами увлажнение и низконапорная пропитка угля, гидрорыхление пласта и метод его поинтервального гидроразрыва. При этом предложено, что способ гидрообработки является приемлемым для данной выработки, а его технологические и гидравлические параметры считаются оптимальными, если соответствующие выполняемому способу контрольные параметры достигаются за технологически допустимое время. Обосновано, что вначале следует определять приемлемость методов гидрообработки, при которых жидкость распространяется по существующим в пласте трещинам и порам, т. к. при этом достигается максимальная равномерность увлажнения, а затем определяется приемлемость гидрорыхления пласта. При недостаточной эффективности гидрорыхления с целью повышения дебита газа при дегазации массива определяется приемлемость поинтервального гидроразрыва пласта.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГИДРООБРАБОТКА, ПРИЕМЛЕМОСТЬ СПОСОБА, ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс мероприятий для борьбы с различного рода геодинамическими явлениями (ГДЯ) и загазированием выработок включает три группы: прогноз явления, способы борьбы с ним в опасных зонах и контроль эффективности выполненных способов. Среди способов борьбы с ГДЯ находит применение гидрообработка, осуществляемая по различным

технологическим схемам и специфическим для каждого способа параметрам нагнетания [1–3]. В частности, гидрообработка угленосного массива в настоящее время широко применяется для разупрочнения труднообрушаемой кровли, а также для разгрузки пласта, управления пыле- и газовойделением [4–11]. В данной работе будем рассматривать только такие схемы гидрообработки, которые осуществляются

из подземных выработок. Поскольку на склонность массива к проявлению динамических явлений влияют три основных фактора: горное давление, внутрислоевое давление свободного газа и прочность угля, — будем рассматривать гидрообработку с позиций влияния именно на эти три фактора.

Для исследования процесса гидрообработки наиболее подходящей является модель трещиновато-пористой среды, предложенная Г. И. Баренблаттом и Ю. П. Желтовым [12]. Согласно ей пористая среда с достаточно развитой трещиноватостью представляется в виде наложения двух пористых сред с порами разных размеров. Первая среда представлена системой трещин, разделяющих блоки, а вторая — системой сообщающихся друг с другом пор и трещин блоков [12].

Механизм распространения жидкости по таким образом представленному массиву зависит от режима нагнетания. Профессор Н. В. Ножкин рассматривал в своих работах следующие четыре режима внедрения текучего в угольный пласт: фильтрация, гидрорасчленение, гидроразрыв, гидроразмыв [10].

«Фильтрация — это такой режим, при котором темп внедрения (нагнетания) текучего не превосходит естественную приемистость пласта, который, вследствие этого, механически не нарушается.

Гидрорасчленение — когда темп нагнетания текучего превосходит естественную приемистость пласта, что сопровождается раскрытием и расширением пластовых трещин (экзогенных, эндогенных, эксплуатационных).

Гидроразрыв — когда темп подачи текучего многократно превышает естественную приемистость пласта и пропускную способность раскрывающихся пластовых трещин, что сопровождается скачкообразным ростом давления до величины, достаточной для разрыва (разрушения) пласта по направлениям сил действия текучего.

Гидроразмыв — растворение минеральных включений или угля может происходить при темпах внедрения жидкости в пласт, соответствующих режимам фильтрации, гидрорасчленения, гидроразрыва».

Для предупреждения всей совокупности ГДЯ, пыле- и газовыделения применяются региональные и локальные способы гидрообработки массива угля. Их назначение — устранить наиболее опасные факторы: смочить мелкие частицы угля для уменьшения пылевыведения за счет их слипания в более крупные образования; закупорить газ в мелких порах для снижения количества свободного газа в трещинах; увеличить пластичность угля за счет его увлажнения для снижения упругой энергии массива и в целом напряженного состояния призабойного пространства вследствие перемещения максимума опорного давления в глубь массива; создать сеть трещин в угле для разгрузки напряженного состояния и увеличения его фильтрационной способности для снижения газоносности.

Выбор способа гидрообработки зависит от фильтрационно-коллекторских свойств угля в конкретных условиях его напряженного состояния. Исследования показали, что для образцов угля с одинаковым коэффициентом водопроницаемости и одинаковыми условиями нагружения одинаковая степень водонасыщения достигается при капиллярной пропитке в течение 3 сут., при малом давлении — 1 сут. и при высоком давлении — от 1,5 до 2 ч., но равномерность влагосодержания с повышением давления ухудшается [7, 13]. Исходя из этого, а также с учетом фактора времени на осуществление способа гидрообработки, будем считать целесообразным выбирать следующие режимы нагнетания жидкости:

— Угольный пласт характеризуется высокими водо- и газопроницаемостью. Жидкость в режиме фильтрации в течение достаточно продолжительного времени под относительно небольшим давлением распространяется по существующим в пласте крупным трещинам и из них в мелкие трещины и поры под действием капиллярных и пленочных сил. При этом достигается максимально возможная равномерность увлажнения угля и закупорка газа в порах. Этот режим, по-видимому, подходит для осуществления регламентированных нормативным документом [2] регионального увлажнения и низконапорной пропитки

угля в качестве локального метода борьбы с динамическими явлениями.

— Угольный пласт характеризуется средними водо- и газопроницаемостью. Для осуществления режима фильтрации в этих условиях потребовалось бы много времени. В этих условиях целесообразно применять режим гидрорыхления. При этом режиме жидкость из нагнетательной скважины — при региональной гидрообработке, или шпура — при локальной гидрообработке будет распространяться по существующим трещинам, развивая их (скачкообразно увеличивая длину), и далее — в мелкие трещины и поры под действием капиллярных и пленочных сил. При этом достигается некоторая разгрузка краевой части пласта за счет развития трещин и увеличивается водо- и газопроницаемость. Последнюю можно использовать для дегазации пласта в случае истечения жидкости из трещин и скважины в выработку после ее разгерметизации. Этот режим, по-видимому, подходит для осуществления регламентируемого нормативным документом [2] гидрорыхления пласта в качестве локальной меры для борьбы с горными ударами и внезапными выбросами угля и газа и их недоразвитых явлений типа внезапного обрушения и/или внезапного выдавливания угля с повышенным газовыделением.

При этих же свойствах пласта целесообразно осуществлять также двухэтапное нагнетание [13]. На первом этапе осуществлять гидрообработку в режиме гидрорыхления и создать сеть трещин. На втором этапе производить нагнетание жидкости в режиме фильтрации из созданной на первом этапе сети трещин. При таком способе гидрообработки могут быть достигнуты преимущества обоих режимов нагнетания.

Другим возможным путем увеличения водо- и газопроницаемости за счет применения регионального гидрорыхления угольного пласта является метод поинтервального гидроразрыва. При этом методе увеличение площади поверхности трещин достигается путем последовательного перемещения разрывного устройства через определенное расстояние от забоя скважины к ее устью и в местах

остановки осуществления гидрорасчленения [14–15].

— Угольный пласт характеризуется низкими водо- и газопроницаемостью. Для осуществления режима фильтрации и даже гидрорыхления потребовалось бы чрезвычайно много времени или эти режимы вообще невозможны. Для этих условий в качестве локального метода гидрообработки ранее регламентировался метод гидроотжима пласта [16]. В действующих нормативных документах [1, 2] данный метод не рассматривается. По-видимому, при такой проницаемости пласта при запрете гидроотжима для предотвращения ГДЯ можно применять только метод бурения разгрузочных скважин.

Для того чтобы учесть фактор времени и фильтрационно-коллекторские свойства пласта, введем понятие *оптимальных параметров способа гидрообработки*. Под оптимальными будем понимать такие параметры, при которых цель гидрообработки достигается за технологически допустимое время. При этом целью регионального увлажнения, низконапорной пропитки и гидрорыхления пласта будем считать закачку в скважину (шпур) проектного количества жидкости до ее прорыва в выработку.

Для поинтервального гидроразрыва можно рассматривать две самостоятельные цели. Первая совпадает с целью гидрорыхления — закачка проектного объема жидкости в скважину. Вторая обусловлена потребностью дегазации — увеличение дебита метана из дегазационной скважины [17]. Возможна также постановка задачи о последовательном достижении обеих целей. На первом этапе за счет кратковременного нагнетания жидкости под высоким давлением осуществлять поинтервальный гидроразрыв. Затем некоторое время нужно осуществлять дегазацию из созданной на первом этапе сети трещин. После снижения дебита до некоторой величины с целью приведения участка пласта в неопасное по проявлению ГДЯ состояние за более короткое время, чем при продолжении дегазации следует переходить ко второму этапу — закачке проектного количества жидкости.

Названные способы гидрообработки характеризуются несколькими группами параметров. В соответствии с назначением мы назвали их контрольными, технологическими и гидравлическими [21].

Контрольными параметрами являются:

— при направленном гидроразрыве труднообрушаемой кровли: необходимая длина и направление распространения трещины, при которых обеспечивается обрушение и снижение площади зависания пород кровли;

— при гидрообработке угольного пласта с целью снижения опасности проявления динамических явлений: необходимый для устранения опасности объем закачанной жидкости в массив — при низконапорном увлажнении, низконапорной пропитке и гидрорыхлении пласта;

— при поинтервальном гидроразрыве пласта с целью увлажнения: необходимый объем закачанной жидкости в скважину; если с целью улучшения дегазации — необходимый дебит газа.

Технологическими параметрами являются: количество одновременно подключаемых к нагнетательной установке скважин (шпуров), расстояние между ними, их длина, направление и диаметр, глубина герметизации, расположение искусственно инициирующих щелей относительно горных выработок, расстояния от устья скважины до точек размещения разрывного устройства в скважинах, а также время гидрообработки.

Гидравлическими параметрами являются давление и скорость (темп) нагнетания.

Контрольные, технологические и гидравлические параметры вначале определяют согласно нормативным документам [1, 2], а затем корректируются по результатам опытных нагнетаний с регистрацией параметров акустической эмиссии (АЭ).

Назначение опытных нагнетаний при контроле процесса по параметрам АЭ: установить наиболее приемлемый для конкретных условий метод гидрообработки и оптимальные гидравлические параметры.

Способ гидрообработки является приемлемым для данной выработки, а технологические и гидравлические его параметры

считаются оптимальными, если соответствующие выполняемому способу контрольные параметры достигаются за технологически допустимое время.

СВЯЗЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С РЕЖИМОМ ГИДРООБРАБОТКИ

Как видно из приведенного анализа способов гидрообработки горного массива, используемые режимы нагнетания жидкости различаются интенсивностью развития трещин. В режиме фильтрации развитие трещин не происходит, в режиме гидрорыхления происходит развитие трещин — скачкообразный их рост, а в режиме гидроотжима пласта происходит настолько интенсивное разрушение призабойного пространства, что отдельные скачки трещин иногда даже сливаются в непрерывный процесс [18]. Однако регламентируемые нормативными документами технологические схемы контроля процесса гидрообработки предполагают лишь контроль давления и темпа нагнетания [1, 2]. При этом для обеспечения требуемого режима гидрообработки давление нагнетания дается в достаточно широких пределах. Так, в соответствии с [2], давление нагнетания при региональном увлажнении составляет 60–70 % от гидростатического давления вышележащих пород; при локальном гидрорыхлении склонных к горным ударам оно меньше или равно 80–90 %, а склонных к внезапным выбросам угля и газа — 75–200 % гидростатического давления; при локальной низконапорной пропитке склонных к динамическим явлениям угольных пластов предельное давление нагнетания меньше либо равно 75 % гидростатического давления вышележащих пород. Такие широкие пределы изменения давления нагнетания обусловлены большой изменчивостью фильтрационно-коллекторских свойств углей. Вместе с тем растущая трещина излучает при своем скачке акустический импульс, называемый акустической эмиссией [19]. Таким образом, регистрируя АЭ можно контролировать режимом гидрообработки угля.

В качестве параметра АЭ, соответствующего конкретному режиму гидрообработки,

следует взять активность АЭ — число импульсов АЭ в единицу времени. Здесь, согласно [19], под импульсом АЭ понимается «сигнал акустической эмиссии, значение которого существенно отлично от нуля в течение ограниченного интервала времени, соизмеримого с временем установления переходных процессов в испытываемом объеме или системе измерений». На рис. 1 показана форма одиночного импульса АЭ длительностью $t_{и}$ — времени переходных процессов как реакции на один «скачок» трещины. Такой импульс образуется на выходе сейсмоприемника (геофона или пьезопреобразователя) при регистрации единичного акта АЭ.

Сейсмоприемник регистрирует все акустические сигналы, которые его достигают. К ним помимо импульсов АЭ от трещин относятся шумы, обусловленные работающим оборудованием и людьми, находящимися в радиусе чувствительности сейсмоприемника. Эти сторонние сигналы называют либо акустическим фоном, либо акустическими шумами. Для выделения импульсов АЭ от трещин из совокупности их с шумами применяют несколько типов селекции, основные из которых: амплитудная, частотная и пространственная [18, 20]. Амплитудная селекция заключается в выделении сигналов, амплитуда которого выше некоторого уровня селекции. На рис. 1 указаны два таких уровня: один пропускает сигналы, амплитуды которых превышают величину $|A_1|$, а второй — величину $|A_2|$.

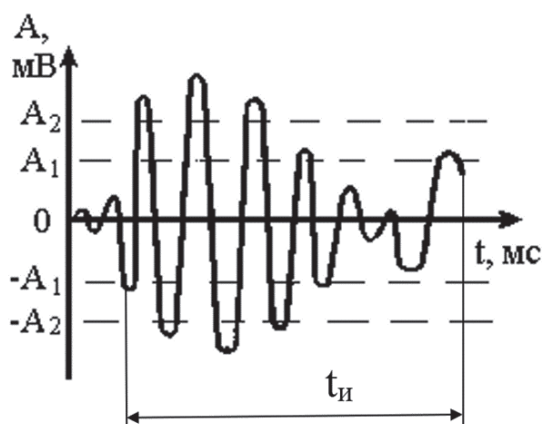


Рис. 1. Одиночный импульс АЭ, образующийся при «скачке» трещины

Один импульс АЭ состоит из последовательности колебаний, число которых зависит от акустической энергии, образующейся при «скачке» (чем длиннее приращение трещины при скачке, тем длиннее последовательность этих колебаний), и от расстояния между трещиной и сейсмоприемником. Чем больше это расстояние, тем меньшее число колебаний в импульсе АЭ, зарегистрированном сейсмоприемником. Объясняется это следующим образом.

Поскольку от берегов растущей трещины в твердом теле распространяются в общем случае несколько типов волн (продольная, поперечная и в слоистой структуре, каковой является угольный пласт в породном массиве, еще и каналовая волна, также на границах угольного пласта с вмещающими породами могут также образовываться и поверхностные волны [20]), имеющих различную скорость, амплитуда результирующей волны есть суперпозиция этих типов волн [20]. Поэтому результирующая волна имеет форму амплитудно модулированного радиоимпульса, спектральный состав которого для большинства сейсмоприемников лежит в интервале 10–1500 Гц, для отдельных типов — до 3 кГц (при сейсмическом мониторинге ГДЯ диапазон частот изменяется от десятых долей Гц до нескольких сотен Гц). Коэффициент затухания звука в твердом теле прямо пропорционален частоте колебаний. Поэтому с увеличением пути прохождения импульса АЭ амплитуда высокочастотных гармоник затухнет быстрее низкочастотных, что приводит к уменьшению и амплитуды, и числа колебаний в импульсе АЭ, превышающих порог амплитудной селекции. Таким образом, однозначно характеризует число «скачков» трещины при ее росте число импульсов АЭ, а не число превышений сигналом уровня амплитудной селекции. Это необходимо учитывать при проектировании оборудования для регистрации импульсов АЭ.

Покажем на основании ранее выполненных работ, как число импульсов АЭ и активность АЭ характеризуют режимы гидрообработки массива.

Предполагается, что на период опытной гидрообработки, когда устанавливаются наиболее приемлемый в данных условиях способ гидрообработки и его оптимальные параметры, горные работы в выработке, сопровождающиеся излучением акустических сигналов в массив, не ведутся. Подавление оставшегося небольшого уровня шумов осуществляется подбором параметров амплитудной и частотной селекции. Однако релаксация напряженного состояния в этот период времени происходит, в том числе с развитием трещин. Их немного, но они есть и образуют фоновую активность АЭ. На практике в очистных выработках она достигала 1–2 импульса за 2–5 минутный интервал времени или более 20 за 1 час. Причем отмечено, что с ростом длины необрушенной кровли над очистной выработкой фоновая активность АЭ возрастает [21]. Здесь под активностью АЭ понимается количество зарегистрированных импульсов АЭ в интервал времени. При гидрообработке угольного пласта впереди подготовительных выработок фоновая активность АЭ может отсутствовать.

Обстоятельство, которое позволяет определить соответствие гидрообработки режиму фильтрации — отсутствие импульсов АЭ, амплитуда которых превышает фоновый уровень, зарегистрированный до начала нагнетания жидкости в скважину. Если активность АЭ превышает фоновый уровень, значит происходит режим гидрорасчленения, соответствующий гидрорыхлению пласта.

При распространении жидкости из фильтрующей части скважины длиной l_ϕ , в соответствии с квазилинейным законом фильтрации, установлена следующая приближенная связь между темпом q и давлением нагнетания P [22]:

$$q = l_\phi (a_1 P^2 + a_0 P), \quad (1)$$

где a_0 и a_1 — коэффициенты, характеризующие фильтрационные свойства обрабатываемого массива.

Используя эту закономерность, в работе [18] было получено следующее выражение, связывающее активность акустической

эмиссии J_T (число импульсов АЭ в интервал времени T) при увеличении средней полудлины трещины (для одновременно растущих n трещин) от начальной l_0 до конечной длины l с фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и давлением нагнетания:

$$J_T = \begin{cases} J_{T,\phi}, & P < P_{кр} \\ J_{T,\phi} + l_\phi (a_1 P^2 + a_0 P) \frac{\varphi T \sqrt{\mu}}{2l\pi h \sqrt{mK\Delta P t}}, & P \geq P_{кр} \end{cases}, \quad (2)$$

где $J_{T,\phi}$ — фоновая активность АЭ, измеренная перед началом гидрообработки; $P_{кр}$ — критическое значение давления нагнетания при котором начинается рост трещин; φ — коэффициент, используемый в выражении для связи начальной и текущей длины скачкообразно растущей трещины; μ — коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; h — среднее значение ширины n одновременно растущих трещин, м; m — пористость пласта; K — проницаемость пласта, Д; $\Delta P = P_T - P_\phi$; P_T — давление жидкости на стенке трещины, Па; P_ϕ — давление жидкости на фронте фильтрации, примерно равное пластовому давлению газа, Па; t — текущее время нагнетания жидкости, с.

Большинство используемых для нагнетания жидкости в угольный пласт насосных установок имеют жесткую рабочую характеристику. Т. е. для них темп нагнетания сохраняется практически постоянным, а давление нагнетания определяется коэффициентом фильтрации жидкости: чем ниже коэффициент фильтрации, тем выше поднимется давление нагнетания. Тогда в соответствии с (2) можно представить следующую зависимость активности АЭ от времени (см. рис. 2).

По технологии гидрорыхления оно осуществляется из фильтрующей части скважины, находящейся за герметизатором. Это расстояние, как правило, составляет от 0,5–1,0 метра — при локальной гидрообработке до более сотни — при региональной. Поэтому одновременно могут развиваться несколько трещин природного или техногенного характера, существовавших в пласте до начала гидрообработки и пересеченных скважиной. Поскольку с увеличением начальной длины

трещины критическое давление, при котором трещина продолжает расти, уменьшается [23], растут одна или несколько трещин, для которых начальная длина была больше критического значения.

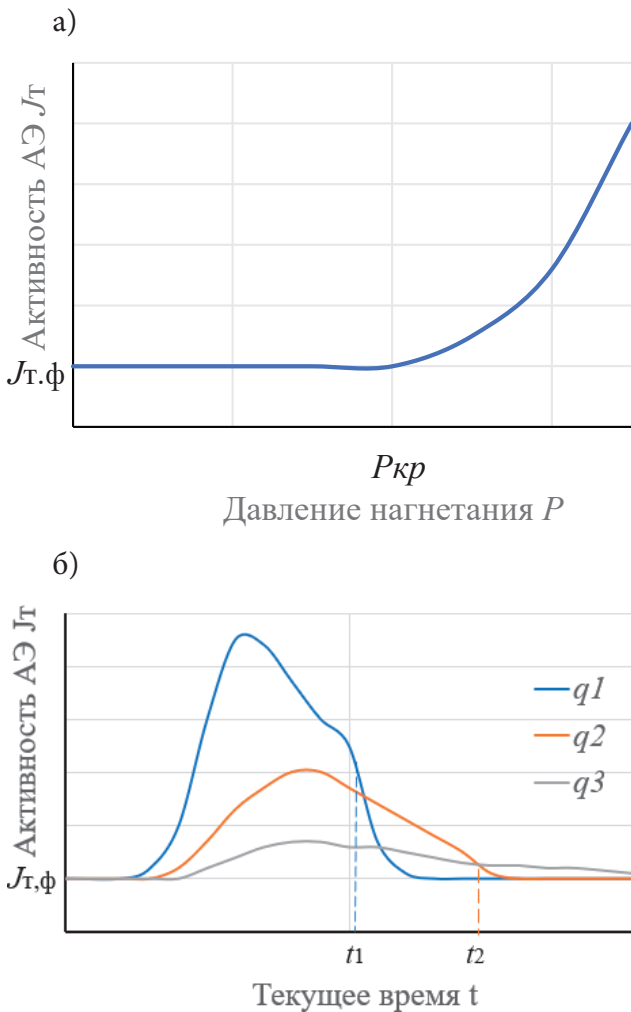


Рис. 2. Зависимость активности АЭ J_t от давления нагнетания P на начальном этапе процессе (а) и от времени нагнетания t за весь период гидрообработки

После включения насосной установки жидкость расходуется на заполнение скважины и фильтрацию в стенки. Если темп нагнетания не превышает естественную приемлемость угля, то давление нагнетания стабилизируется на некотором уровне, не достигающем критического значения, и развития трещин не происходит. Если же темп нагнетания превышает естественную приемлемость угля, давление нагнетания достигает критического значения $P_{кр}$ и начинается

скачкообразный рост трещин, сопровождающийся превышением активности АЭ фонового значения $J_t.ф$. Пока вновь образованная поверхность трещин небольшая, продолжается увеличение давления нагнетания до некоторой величины, при которой темп нагнетания насосной установки становится равным расходу на заполнение полостей растущих трещин и фильтрацию в их стенки. Подъем давления до этой предельной величины сопровождается увеличением активности АЭ (см. рис. 2а). При осуществлении очередного «скачка» трещины давление нагнетания кратковременно немного снижается, затем вновь возрастает.

По мере увеличения площади растущих трещин возрастает расход жидкости на заполнение вновь образовавшихся полостей и фильтрацию в их стенки. Но поскольку темп нагнетания насосной установки практически постоянен, заполнение вновь образующихся полостей происходит медленнее. Поэтому активность АЭ со временем нагнетания снижается (см. рис. 2б) [21, 24].

На рис. 2б) рассмотрен случай, когда в три скважины одинаковой длины и глубины герметизации нагнетание производится насосными установками с разным темпом нагнетания $q1-q3$. Причем $q1 > q2 > q3$. При нагнетании с темпом $q1$ происходит наиболее интенсивный процесс роста трещин, сопровождающийся высоким значением активности АЭ. Поэтому как минимум одна из растущих трещин быстро к моменту $t1$ достигает борта выработки или стенки соседней не загерметизированной скважины. После этого уменьшается давление нагнетания и активность АЭ быстро опускается до фонового уровня. При нагнетании с меньшим темпом $q2$ процесс заполнения трещин происходит медленнее, поэтому снижается скорость их роста и активность АЭ, а время $t2$ до прорыва жидкости на стенки выработки возрастает. При еще меньшем темпе нагнетания $q3$ активность АЭ регистрируется на еще меньших значениях, причем прорыва жидкости на забой может и не наступить до момента закачки в скважину проектного объема жидкости.

Гидрообработка может закончиться до закачки в скважину требуемого объема жидкости, если рост трещин происходил настолько быстро, что хотя бы одна их трещин достигла борта выработки или стенок другой не загерметизированной скважины. Исследования показали, что чем выше активность АЭ, тем быстрее трещины достигают борта выработки и в скважину удается закачать меньше жидкости [21, 24]. Таким образом, регулируя темп нагнетания жидкости в скважину можно по показаниям активности АЭ судить об интенсивности развития трещин.

Исследования показали, что при длине шпуров до 6 м и глубине герметизации на всю длину шпура или близко к этому в пластах с низкой водопроницаемостью происходит гидроотжим пласта [25]. Но, поскольку в действующих нормативных документах его нет, в данной работе его приемлемость мы не рассматриваем.

АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОФИЛАКТИ- ЧЕСКОГО ГИДРОВОЗДЕЙСТВИЯ

Первоначальные исследования АЭ при текущем прогнозе ГДЯ были сделаны с помощью стационарной аппаратуры типа ЗУА-4. Эти исследования позволили выявить форму импульса АЭ (см. рис. 2.1) и его длительность. Оказалось, что импульсы естественной АЭ, возникающей в массиве при ведении горных работ, имеют среднюю длительность 100–120 мс, а при очень «громких тресках» эта длительность достигала и 200 мс. При гидроотжиме пласта импульсы АЭ сливались в непрерывный процесс. Эти исследования позволили также установить уровень фоновых шумов от работающего в ремонтную смену оборудования: вентилятора местного проветривания (ВМП), включаемого конвейера и электросверла или буровой установки. При прослушивании записи сигналов на магнитную ленту легко идентифицировались источники этих сигналов, а также голоса рабочих, удары по металлическим предметам и прочие сигналы. Причем амплитуда этих сигналов

и частотный спектр могли значительно изменяться.

Однако использовать стационарную аппаратуру для мониторинга процесса гидрообработки было неудобно, т.к., во-первых, не все горные выработки были оборудованы звукоулавливающей аппаратурой (а на шахтах Кузбасса ее вообще не было), и, во-вторых, эта аппаратура не была спроектирована для прослушивания сигналов в выработках непосредственно во время осуществления гидрообработки, а только на поверхности в специально-выделенных помещениях.

Таким образом, для мониторинга процесса гидрообработки акустико-эмиссионным методом нужен был переносной прибор, позволяющий выделять импульсы естественно АЭ на фоне шумов в ремонтную смену. Прибор должен был образовывать один импульс на каждую непрерывную последовательность сигналов длительностью до 120 мс. В случае превышения этой непрерывной последовательности сигнала до 240 мс прибор должен был вырабатывать два импульса АЭ (длительный «скачок» растущей трещины воспринимали как два «скачка»). При контроле АЭ в процессе гидроотжима сигналы АЭ разделить один от другого во времени невозможно, т.к. они сливаются в непрерывный процесс. Поэтому в случае непрерывной последовательности превышений сигналом уровня амплитудной селекции на каждую последовательность длиной 120 мс было решено вырабатывать один импульс АЭ. И такой прибор с аналогово-цифровой обработкой сигналов геофона был создан [18].

Для подавления акустических шумов различной природы в приборе предусмотрели амплитудную и частотную селекцию. Принцип работы амплитудной селекции пояснен на рис. 1. Частотная селекция была основана на том, что импульсы от «скачков» трещины имели более высокочастотные составляющие спектра чем ВМП и конвейер. Для настройки уровней амплитудной и частотной селекции в конкретной горной выработки усиленный сигнал с выхода геофона подавался также на головные телефоны. Это позволяло оператору

производить необходимые настройки органов управления усилением, амплитудной и частотной селекцией, идентифицируя «на слух» сигналы от «скачков» растущих трещин, вызванных гидрообработкой, на фоне других шумов.

Выделенные таким образом импульсы АЭ автоматически подсчитывались счетчиком и показания высвечивались на цифровом табло. Для подсчета импульсов в единицу времени (интервал контроля) в приборе имелся двухразрядный счетчик минутных интервалов.

С помощью данного прибора УКАЭ-1 были выполнены исследования акустической эмиссии при гидрообработке угольных пластов на шахтах Кузбасса [18]. На основании этих исследований была разработана методика получения из аналитически полученных функциональных зависимостей удобные для практического использования формулы, связывающих акустическую эмиссию с технологическими и гидравлическими параметрами способов гидрообработки. Назначение этой методики — заменить большое количество параметров, характеризующих фильтрационно-коллекторские свойства массива в конкретной выработке, которые невозможно оперативно измерить, на интегральные коэффициенты, устанавливаемые по результатам опытных нагнетаний.

Так было получено выражение, связывающее суммарное число J_{Σ} импульсов АЭ, зарегистрированных при росте трещины от начальной величины l_0 , сделанной щелеобразователем, до конечной длины l , примерно равной расстоянию от щелеобразователя до места прорыва жидкости в выработку при направленном гидроразрыве кровли пласта [21]:

$$J_{\Sigma} = k_{нзр} \ln \frac{l}{l_0}, \quad (3)$$

Установив по результатам опытного нагнетания коэффициент $k_{нзр}$, можно оценить площадь созданной трещины S гидроразрыва по следующей формуле [21]:

$$S \approx \frac{\pi}{4} l_0^2 \exp\left(\frac{2J_{\Sigma}}{k_{нзр}}\right). \quad (4)$$

Аналогично по результатам опытного гидрорыхления пласта можно определить коэффициенты a и V в следующих формулах для определения оптимального времени нагнетания $T_{\text{опт}}$ и оптимального темпа нагнетания $q_{\text{опт}}$, при которых к моменту прорыва жидкости на забой в скважину поступит требуемый объем жидкости Q .

$$T_{\text{опт}} = a(Q-V)^2; \quad (5)$$

$$q_{\text{опт}} = \frac{Q}{a(Q-V)^2}. \quad (6)$$

Из этих формул видно, что чем больший объем жидкости необходимо закачать в скважину, тем меньшим должен быть темп нагнетания и большим время закачки. При этом коэффициенты $\delta_1(q)$ и $\delta_2(q)$ в зависимости оптимальных значений активности АЭ $J_{\text{Топт}}$ от времени вида (7) также можно определить в результате обработки результатов замера текущих значений активности АЭ во времени.

$$J_{\text{Топт}} = \frac{\delta_1(q)}{t - \delta_2(q)\sqrt{t}}. \quad (7)$$

Эта зависимость получена из выражения (2) при условии $J_{\text{Т.ф}}=0$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ПРИЕМЛЕМОГО СПОСОБА ГИДРООБРАБОТКИ И ЕГО ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Одним из недостатков нормативных документов [1–3] является отсутствие рекомендаций по выбору наиболее приемлемого способа гидрообработки в конкретном забое. Выполнение опытного цикла гидрообработки с мониторингом процесса акустико-эмиссионным методом позволяет такие рекомендации дать. Для этого предлагается следующая возможная последовательность действий, основанная на анализе ранее выполненных исследований поведения АЭ при различных режимах гидрообработки.

Для начала необходимо примерно оценить максимально допустимое время каждого цикла гидрообработки в соответствии с планом ведения горных работ. Этот параметр будем

считать основным для выбора наиболее приемлемого способа гидрообработки. После этого можно перейти к опытному нагнетанию.

Для контроля активности АЭ можно использовать портативный прибор типа УКАЭ-1 или ему подобный, позволяющий выделять импульсы АЭ на фоне помех и вести их подсчет во времени.

Длины скважин, их взаимное расположение и глубина герметизации при осуществлении способов гидрообработки определяется соответствующими нормативными документами (в документах [1, 2] эти параметры отсутствуют. Поэтому нами использовались рекомендации нормативного документа [26]).

Определение приемлемости и оптимальных параметров регионального увлажнения и низконапорной пропитки.

Эти два способа гидрообработки, соответственно региональный и локальный, характеризуются нормативными документами относительно низкими значениями давления нагнетания с целью равномерной пропитки угля. И начинать определение приемлемости способа гидрообработки в конкретном забое следует именно с них и вот почему. Наиболее равномерно жидкость проникает в пласт в режиме фильтрации. Поэтому данные способы гидрообработки, использующие этот режим, являются наиболее эффективными. Общая характеристика этих способов — при них не должно происходить скачкообразного роста трещин. Алгоритм определения приемлемости этого способа следующий.

Вначале вычисляют объем жидкости, который необходимо закачать в пласт через скважину для достижения влажности, при которой не происходят ГДЯ. Это значение, как следует из большинства литературных источников и нормативных документов, составляет 6%. Затем, с учетом технологически допустимого времени гидрообработки, вычисляют необходимый темп нагнетания жидкости и по нему выбирают тип насосной установки.

Опытному нагнетанию предшествует измерение фоновой активности АЭ примерно

за 20-и минутный интервал времени. Затем осуществляют нагнетание жидкости, плавным увеличением давления с одновременным контролем активности АЭ. Повышение давления осуществляют регулированием слива части жидкости с выхода нагнетательной установки на всас или в выработанное пространство. При превышении суммарного числа импульсов АЭ значения фоновой активности $J_{20, \phi}$ на два импульса за стандартный 20-минутный интервал контроля (или, что часто возможно, за меньший промежуток времени) снижают давление нагнетания на 0,5 МПа и начинают подсчет импульсов АЭ в новый стандартный интервал контроля. Если при вновь установленном давлении нагнетания суммарное число импульсов АЭ за 20-минутный интервал контроля не превысит значение $J_{20, \phi} + 1$, то это давление и соответствующий ему темп нагнетания принимают за оптимальный. А если превысит, то давление опытного нагнетания снижают еще на 0,5 МПа, начинают новый интервал контроля и т.д. до тех пор, пока в очередном интервале контроля не будет установлено оптимальное давление нагнетания.

Если при достижении максимально возможного для данного типа насосной установки давления нагнетания суммарное число импульсов АЭ за 20-минутный интервал контроля не превысит значение $J_{20, \phi} + 1$, то данное давление и соответствующий ему темп нагнетания принимают за оптимальные.

Далее проверяют возможность осуществления (приемлемость) регионального увлажнения и низконапорной пропитки через одну скважину с установленными оптимальными гидравлическими параметрами за технологически допустимое время гидрообработки. Для этого путем деления объема жидкости, который необходимо закачать в пласт через скважину, на оптимальный темп нагнетания определяют возможную продолжительность гидрообработки. В случае, если последняя превышает технологически допустимое время гидрообработки, принимают следующие решения:

– При гидрообработке из забоя подготовительной выработки осуществлять

низконапорную пропитку не через одну (осевую), а через две барьерные скважины одновременно или определять приемлемость гидрорыхления пласта.

– При гидрообработке из забоя лавы осуществлять низконапорную пропитку пласта через две или более скважины одновременно или определять приемлемость гидрорыхления пласта.

Количество используемых одновременно скважин определяется путем подключения к насосной установке двух, трех и более скважин, пока не будет достигнут максимально возможный для данного типа оборудования темп нагнетания при давлении нагнетания, не превышающем оптимального значения.

– При гидрообработке блока из подготовительной выработки осуществлять региональное увлажнение из такого максимально возможного одновременно подключенных скважин, при котором обеспечивается оптимальное значение давления нагнетания.

Результаты определений и вычислений оформляют соответствующим актом.

Определение приемлемости и оптимальных параметров локального гидрорыхления пласта.

Если локальный способ гидрообработки в режиме фильтрации неприемлем, переходят к определению гидрорыхления пласта.

Вначале замеряют фоновую активность АЭ за 2-минутный интервал контроля $J_{2, \phi}$ при неработающей насосной установке. Затем включают насосную установку, плавно повышают давление нагнетания регулированием слива части жидкости с ее выхода на всас и регистрируют импульсы АЭ.

Оптимальными для локального гидрорыхления являются давление и соответствующий ему темп нагнетания, при котором трижды зарегистрировано суммарное количество импульсов АЭ за 2-минутные интервалы контроля, которое находится в пределах $J_{2, \phi} + 2 < J_{2, \phi} \leq J_{2, \phi} + 10$. При превышении указанного предела активности АЭ снижают давление нагнетания на 0,5 МПа и начинают новый 2-минутный интервал контроля АЭ,

выдерживая установленное давление нагнетания на постоянном уровне. Эти операции продолжают до тех пор, пока не будет трижды зарегистрирована активность АЭ выше фонового уровня, но не более $J_{2, \phi} + 10$.

Далее проверяют возможность осуществления (приемлемость) гидрорыхления через одну скважину с установленными в процессе опытного нагнетания гидравлическими параметрами за технологически допустимое время гидрообработки. Для этого, путем деления объема жидкости, который необходимо закачать в пласт через скважину, на оптимальный темп нагнетания определяют возможную продолжительность гидрообработки. Если последняя не превышает технологически допустимое время, осуществляют опытное нагнетание в скважину при установленном оптимальном темпе нагнетания. Если при этом удастся закачать требуемый объем жидкости в скважину до ее прорыва в выработку, гидрорыхление считается приемлемым, а параметры — оптимальными.

В случае, если рассчитанная продолжительность превышает технологически допустимое время, принимают следующее решение: осуществлять гидрорыхление через несколько скважин одновременно или применять другой локальный способ предотвращения ГДЯ.

Если при опытном нагнетании при установленных оптимальных параметрах не удастся закачать в скважину требуемый объем жидкости до ее прорыва в выработку, рекомендуется применять другой способ предотвращения ГДЯ.

Результаты определений и вычислений оформляют соответствующим актом.

Определение приемлемости и оптимальных параметров регионального гидрорыхления пласта.

Следует различать гидрорыхление пласта с целью его увлажнения или повышения дебита газа при дегазации. Если гидрорыхление осуществляется с целью его увлажнения, интенсивность роста трещин не должна быть слишком большой чтобы не произошел

прорыв жидкости в выработку до закачки требуемого объема. Следовательно, активность АЭ не должны превышать некоторого значения, которое по ряду выполненных ранее экспериментов составило примерное значение $J_{2,\phi} + 10$ (на новых экспериментальных объектах это значение может быть другим). Таким образом, алгоритм определения приемлемости и оптимальных технологических параметров регионального гидрорыхления совпадает с алгоритмом для локального гидрорыхления.

Если гидрорыхление осуществляется с целью увеличения фильтрационной способности угля для повышения эффективности дегазации, то развитие системы трещин должно произойти без существенного увлажнения угля. Поэтому последовательность действий предлагается следующей.

При принятых для дегазации расстоянии между скважинами и их длине рассчитывают необходимый объем поступления жидкости в одиночную скважину чтобы в предположении о равномерном ее распределении по массиву влажность угля возросла примерно на 1 %. Данный объем принимают за предельный $Q_{пр}$ (лит) для осуществления гидрорыхления. Зная темп нагнетания насосной установки q (лит/мин), определяют требуемое время нагнетания до подачи в скважину рассчитанного предельного объема жидкости $t_{тр}$ по формуле:

$$t_{тр} = Q_{пр} / q, \text{ мин.} \quad (8)$$

Далее замеряют фоновую активность АЭ за 2-минутный интервал контроля $J_{2,\phi}$ при неработающей насосной установке. Затем включают насосную установку без слива жидкости на всас. По мере заполнения скважины жидкостью регистрируют давление и время нагнетания, а также активность АЭ. Опытную закачку заканчивают через время $t_{тр}$. Во время нагнетания давление не должно снижаться более чем на 10 % от максимально достигнутого, и при осмотре борта выработки, из которой были пробурены скважины, не должна быть обнаружена жидкость, просочившаяся по растущей трещине.

Максимально зарегистрированная активность АЭ не должна быть меньше величины $J_{2,\phi} + 10$. Если эти условия выполнены, гидрорыхление считается приемлемым, а технологические и гидравлические параметры оптимальными.

Результаты определений и вычислений оформляют соответствующим актом.

Окончательно приемлемость гидрорыхления при установленных параметрах определяется после проверки на увеличение дебита газа до необходимой величины, так как неэффективное гидрорыхление возможно из-за прорыва одной магистральной трещины. В результате площадь поверхности трещин возрастет незначительно.

Гидрорыхление считается неприемлемым при данных параметрах в следующих случаях.

– Если во время нагнетания жидкости активность АЭ не достигала значения $J_{2,\phi} + 10$. В этом случае проводят опытное нагнетание в изложенной выше последовательности действий, но при одновременном нагнетании жидкости двумя насосными установками, подключенными параллельно.

– Если при нагнетании жидкости одной или двумя параллельно подключенными насосными установками дебит газа после окончания гидрообработки не достигает желаемой величины. В этом случае проверяют приемлемость поинтервального гидроразрыва пласта.

Определение приемлемости и оптимальных параметров поинтервального гидроразрыва пласта.

На данном этапе работы рассматривается применение поинтервального гидроразрыва пласта только в качестве регионального способа повышения эффективности дегазации пласта. Гидрообработка осуществляется из необсаженных дегазационных скважин, схема расположения которых выбирается в соответствии с [3]. Технологическая схема поинтервального гидроразрыва, включающая скважину и применяемое оборудование, показана в работе [14]. Разрывное устройство рассмотрено в работе [27]. Расстояние между точками установки разрывного

устройства выбирается примерно равным расстоянию между скважинами, а при испытаниях в шахтных условиях составляло 10 м. В нечетных номерах скважин (1-я, 3-я, 5-я и т.д., начиная с ближайшей к забою лавы) разрывное устройство вначале устанавливается у забоя скважины и измеряют расстояние от места установки до устья скважины. В четных номерах скважин разрывное устройство вначале устанавливают примерно на 5 м ближе к устью скважины чем в нечетных.

Нагнетанию предшествует измерение фоновой активности АЭ в течение 3–5 двухминутных интервалов контроля. По результатам которого рассчитывается среднее значение $J_{2, \phi, ср}$. Нагнетание жидкости осуществляется начиная с ближайшей к забою лавы скважины при максимально возможном давлении нагнетания для данной насосной установки (станции). При этом регистрируется давление нагнетания и активность АЭ.

Превышение активности АЭ значения $J_{2, \phi, ср}$ в несколько раз является необходимым условием для приемлемого поинтервального гидрорыхления пласта. Нагнетание жидкости в месте установки разрывного устройства заканчивают после снижения активности АЭ до фонового значения и/или до появления жидкости в соседней скважине. После этого нагнетание прекращают и передвигают разрывное устройство на 10 м ближе к устью скважины. Здесь процесс гидроразрыва повторяют и вновь передвигают разрывное устройство на 10 м к устью скважины. После осуществления поинтервального гидроразрыва пласта в первой скважине выполняют его во второй и т.д. до обработки всего блока.

Поинтервальный гидроразрыв считается приемлемым, а параметры его оптимальными, если дебит газа из скважин возрос в требуемое количество раз.

ВЫВОДЫ

1. Режимы нагнетания жидкости в массив при осуществлении способов гидрообработки угольного пласта различаются интенсивностью развития трещин, которую удобно контролировать активностью АЭ:

– При региональном увлажнении и низконапорной пропитке суммарное число импульсов АЭ за 20-минутный интервал контроля не должно превышать значение $J_{20, \phi} + 1$;

– При локальном гидрорыхлении пласта суммарное количество импульсов АЭ за 2-минутные интервалы контроля J_2 должно находиться в пределах $J_{2, \phi} + 2 < J_{2, \phi} \leq J_{2, \phi} + 10$;

– При региональном гидрорыхлении пласта максимально зарегистрированная активность АЭ не должна быть меньше величины $J_{2, \phi} + 10$;

– При поинтервальном гидроразрыве пласта активность АЭ должна в несколько раз превышать среднее значение $J_{2, \phi, ср}$, рассчитанное по результатам измерения в течение 3–5 двухминутных интервалов контроля.

2. Способы гидрообработки характеризуются контрольными, технологическими и гидравлическими параметрами.

3. Способ гидрообработки считается приемлемым, а его технологические и гидравлические параметры оптимальными, если контрольные параметры достигаются за технологически допустимое время.

4. Задачей следующего этапа работы в данном направлении является разработка и изготовление аналогичного УКАЭ-1 прибора, но реализованного в цифровой форме. Это позволит более «тонко» устанавливать уровни амплитудной и особенно частотной селекции сигналов АЭ на фоне помех, чем блоками с аналоговой формой обработки сигнала.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024–2025 гг.» (рег. № 124041100071–9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.
2. Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах: руководство по безопасности. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21.08.2017 г. № 327. 89 с.
3. Инструкция по дегазации угольных шахт: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Серия 05. Вып. 2. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. 250 с.
4. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В. и др. Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. 2016. № 4. С. 3–11.
5. Мартынюк П.А., Павлов В.А., Сердюков С.В. Комплексное использование гидроразрыва и деформационных измерений в оценке напряженного состояния массива проницаемых горных пород // ГИАБ. 2013. № 2. С. 155–163.
6. Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. 2014. № 5. С. 137–142.
7. Y Zhao, S. Cao, D. Shan et al Crack propagation and crack direction changes during the hydraulic fracturing of coalbed // Computers and Geotechnics. 2019. No. 111. P. 229–242.
8. Experimental and numerical investigation on the effect of moisture on coal permeability // Nat Hazard. 2018. No. 90(3). P.1201–1221.
9. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В. и др. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель», 2011. 524 с.
10. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. М.: Недра, 271 с.
11. Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Серия 05. Выпуск 44. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. 68 с.
12. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых средах. ДАН СССР. 1960. Т. 132. Вып. 3. С. 545–548.
13. Гельфанд Ф.М., Журавлев В.П., Поелуев А.П. и др. Новые способы борьбы с пылью / М.: Недра, 1975. 288 с.
14. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Клишин С.В. и др. Поинтервальный гидроразрыв угольного пласта для интенсификации процесса дегазации // Уголь. 2022. № S12. С. 16–22.
15. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Связев С.И. и др. Повышение коэффициента предварительной дегазации методом поинтервального гидроразрыва // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. Журнал. 2023. № 9. С. 14–18.
16. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. Утв. 06.10.1976 / Минуглепром СССР. М.: Недра, 1977. 159 с.
17. Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Понизов А.В. Моделирование процесса гидравлической гидрообработки и дегазации выбросоопасных угольных пластов при столбовой системе разработки с высокими нагрузками на очистной забой // ГИАБ. 2017. № S1. С. 90–101.
18. Шадрин А.В. Автоматизированный мониторинг противовыбросных мероприятий при разработке угольных пластов: дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук: 25.00.20 // Шадрин Александр Васильевич. Кемерово, 2004. 356 с.

19. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
20. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. М.: Недра, 1988. 199 с.
21. Шадрин А.В., Телегуз А.С. Экспресс-метод определения оптимальных параметров гидрообработки угольно-породного массива по акустической эмиссии // Вестник КузГТУ. 2019. № 4. С. 5–16.
22. Чернов О.И., Розанцев Е.С. Подготовка шахтных полей с газовыбросоопасными параметрами. М.: Недра, 1975. 287 с.
23. Ионов В.Н., Селиванов В.В. Динамика разрушения деформируемого тела. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.
24. Шадрин А.В., Клишин В.И. Установление связи параметров акустической эмиссии с фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и характеристиками насосной установки при гидрообработке кровли и угольного пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 1. С. 77–87.
25. Шадрин А.В., Зыков В.С. Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов. Обзорная информация, ЦНИЭИуголь. М., 1991. 43 с.
26. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам и внезапным выбросам (к разделу 5 главы III Правил безопасности на угольных шахтах). СПб.: ВНИМИ, 1999. 133 с.
27. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Кокоулин Д.И. и др. Разработка устройства поинтервального разрыва угольного пласта // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2018. Т. 5. № 2. С. 245–249.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.67.72.001

UDC 622.831.31

© A.V. Shadrin, 2024

A.V. SHADRIN

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Institute of Coal «The FRC of Coal and Coal Chemistry of SB of RAS», Kemerovo

e-mail: avsh-357@mail.ru

DETERMINATION OF THE ACCEPTABILITY OF COAL SEAM HYDROTREATMENT METHODS FOR SPECIFIC CONDITIONS BASED ON THE RESULTS OF ACOUSTIC EMISSION CONTROL

An algorithm is proposed for determining the most suitable method for the specific conditions of hydrotreating a coal seam and its optimal technological (characterizing the location of wells and their parameters) and hydraulic (pumping unit injection rate and pressure) parameters based on the results of monitoring the intensity of growing cracks under the action of the injected liquid by the acoustic emission method. The considered methods of hydrotreatment were humidification and low-pressure impregnation of coal, hydraulic fracturing and the method of its inter-interval hydraulic fracturing, regulated by current regulatory documents. At the same time, it is proposed that the hydrotreatment method is acceptable for this development, and its technological and hydraulic parameters are considered optimal if the control parameters corresponding to the performed method are achieved in a technologically acceptable time. It

is justified that the acceptability of hydrotreating methods should first be determined, in which the liquid spreads through cracks and pores existing in the formation, since this achieves maximum uniformity of humidification, and then the acceptability of hydraulic loosening of the formation is determined. If the efficiency of hydraulic fracturing is insufficient in order to increase the gas flow rate during the degassing of the massif, the acceptability of interval hydraulic fracturing is determined.

The stress field in the carboniferous massif containing the formation is constructed by the boundary element method, which solves the boundary value problem of the theory of elasticity. An elastically plastic problem is reduced to this problem, in which the zone of plasticity or the extremely stressed zone are the marginal zones of the formation. The criteria for the onset of the limiting state are the general and special Coulomb–Mohr criteria.

The constructed stress field in the vicinity of mining operations is heterogeneous and has a significant effect on the parameters of the hydraulic fracturing crack, since its components are used in the main dependencies of the Griffiths–Irwin theory. This is the field.

Based on the analysis of the results obtained, the features in the propagation of the hydraulic fracturing crack in the vicinity of the treatment work are revealed.

Keywords: COAL SEAM, HYDROTREATMENT, ACCEPTABILITY OF THE METHOD, OPTIMAL PARAMETERS, ACOUSTIC EMISSION.

REFERENCES

1. Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits: federal norms and rules in the field of industrial safety. Moscow: CJSC STC PB, 2021. Ser. 05. Issue 49. 128 p. [In Russ.].
2. Recommendations for the safe conduct of mining operations on coal seams prone to dynamic phenomena: safety guide. Approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 08/21/2017 No. 327. 89 p. [In Russ.].
3. Instructions for degassing coal mines: federal norms and rules in the field of industrial safety. Series 05. Issue 2. Moscow: CJSC Scientific and Technical Center for Industrial Safety Research, 2012. 250 p. [In Russ.].
4. Serdyukov S.V., Kurlenya M.V., Patutin A.V. and others. Experimental verification of the method of directional hydraulic fracturing of rocks // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2016. No. 4. P. 3–11. [In Russ.].
5. Martynyuk P.A., Pavlov V.A., Serdyukov S.V. Complex use of hydraulic fracturing and deformation measurements in the assessment of the stress state of an array of permeable rocks // Mining information and analytical bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2013. No. 2. P. 155–163. [In Russ.].
6. Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V. Technology of directional hydraulic fracturing for the management of hard-to-collapse roofs and degassing of coal seams // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2014. No. 5. P. 137–142. [In Russ.].
7. Y Zhao, S. Cao, D. Shan et al Crack propagation and crack direction changes during the hydraulic fracturing of coalbed // Computers and Geotechnics. 2019. No. 111. P. 229–242.
8. Experimental and numerical investigation on the effect of moisture on coal permeability // Nat Hazard. 2018. No. 90(3). P.1201–1221.
9. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V. et al. Safety problems and new technologies of underground mining of coal deposits. Russian Academy of Sciences. Siberian Branch, Institute of Mining. Novosibirsk: Publishing house «Novosibirsk writer», 2011. 524 p. [In Russ.].
10. Nozhkin N.V. Advance degassing of coal deposits. M.: Nedra, 271 p. [In Russ.].

11. Instructions for dust control in coal mines: federal norms and rules in the field of industrial safety. Episode 05. Issue 44. Moscow: CJSC Scientific and Technical Center for Industrial Safety Research, 2015. 68 p. [In Russ.].
12. Barenblatt G.I., Zheltov Yu.P. On the basic equations of filtration of homogeneous liquids in fractured media. DAN USSR. 1960. Vol. 132. Issue 3. P. 545–548. [In Russ.].
13. Gelfand F.M., Zhuravlev V.P., Poeluyev A.P., etc. New ways to combat dust / M.: Nedra, 1975. 288 p. [In Russ.].
14. Klishin V.I., Oprug G.Yu., Klishin S.V. and others. Interval hydraulic fracturing of a coal seam for intensification of the degassing process // Coal [Ugol]. 2022. No. S12. P. 16–22. [In Russ.].
15. Klishin V.I., District G.Yu., Svyaz S.I., etc. Increasing the coefficient of pre-degassing by the method of intermittent hydraulic fracturing // High-tech technologies for the development and use of mineral resources: scientific journal. 2023. No. 9. P. 14–18. [In Russ.].
16. Instructions for the safe conduct of mining operations on formations dangerous for sudden emissions of coal, rock and gas. Approved 06.10.1976 / Minugleprom USSR. M.: Nedra, 1977. 159 p. [In Russ.].
17. Karkashadze G.G., Mazanik E.V., Ponizov A.V. Modeling of the process of hydraulic hydrotreatment and degassing of explosive coal seams with a pillar mining system with high loads on the treatment face // Mining information and analytical bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2017. № S1. P. 90–101. [In Russ.].
18. Shadrin A.V. Automated monitoring of anti-blowout measures in the development of coal seams: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 25.00.20 // Shadrin Alexander Vasilyevich. Kemerovo, 2004. 356 p. [In Russ.].
19. Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. Acoustic emission. Application for testing materials and products. Moscow: Publishing House of Standards, 1976. 272 p. [In Russ.].
20. Azarov N.Ya., Yakovlev D.V. Seismoacoustic method of forecasting mining and geological conditions of coal deposits. M.: Nedra, 1988. 199 p. [In Russ.].
21. Shadrin A.V., Telegus A.S. Express-method for determining the optimal parameters of hydrotreating a coal-rock massif by acoustic emission // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2019. No. 4. P. 5-16. [In Russ.].
22. Chernov O.I., Rozantsev E.S. Preparation of mine fields with gas-explosive parameters. M.: Nedra, 1975. 287 p. [In Russ.].
23. Ionov V.N., Selivanov V.V. Dynamics of destruction of a deformable body. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 272 p. [In Russ.].
24. Shadrin A.V., Klishin V.I. Establishing the relationship of acoustic emission parameters with the filtration and collector properties of the array and the characteristics of the pumping unit during hydrotreating of the roof and coal seam // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of work in the coal industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2018. No. 1. P. 77–87. [In Russ.].
25. Shadrin A.V., Zykov V.S. Acoustic emission of explosive formations. Overview information, TSNI Eiugol. M., 1991. 43 p. [In Russ.].
26. Instructions for the safe conduct of mining operations in mines developing coal seams prone to rock impacts and sudden emissions (to section 5 of Chapter II of the Rules of Safety in Coal Mines). St. Petersburg: VNIMI, 1999. 133 p. [In Russ.].
27. Klishin V.I., Oprug G.Yu., Kokoulin D.I. and others. Development of a device for an intervalny rupture of a coal seam // Fundamental and applied issues of mining sciences [Fundamentalnyye i prikladnyye voprosy gornyykh nauk]. 2018. Vol. 5. No. 2. P. 245–249. [In Russ.].