

Математическое моделирование радиальной фильтрации в угольном пласте с учетом его фрактальной пустотной структуры

В. Н. Павлыш, Ю. Н. Добровольский, Л. А. Лазебная, Д. В. Бельков

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

L.Lazebnaya@mail.ru

Аннотация

Предварительная обработка угольных пластов жидкостями и газами является одним из основных средств решения проблемы борьбы с опасными явлениями в шахтах. В данной работе выполнен анализ способов гидравлического воздействия на угольные пласты и проведены исследования по повышению качества гидравлической обработки угольных пластов. С помощью метода разделения переменных выполнен анализ уравнения пьезопроводности для радиальной фильтрации в среде с фрактальной геометрией пустотности угольного пласта. Получены аналитические решения.

Актуальность

Предварительная обработка угольных пластов жидкостями в различных режимах является важным средством решения проблемы борьбы с опасными явлениями в шахтах. Одно из основных преимуществ этого способа – заблаговременное и необратимое изменение состояния и свойств угольного массива, позволяющее предупредить возникновение опасных явлений при ведении горных работ.

Широкие исследования по разработке теории движения жидкости и газа в угольном пласте ведутся с начала 60-х годов 20-го века. Сходство основных закономерностей процессов движения жидкости в угле и горных породах привело к тому, что базой для этих исследований стала теория фильтрации в нефтегазовых коллекторах и грунтах.

Все свойства угольного пласта как фильтрующей среды сказываются на характере движения жидкости, и это в той или иной степени необходимо учитывать при построении модели. В настоящее время можно считать установленным, что движение жидкости при нагнетании подчиняется закону Дарси. Это подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями различных авторов. Незначительные отклонения от линейного закона вполне удовлетворительно объясняются деформацией скелета угля в процессе напорной фильтрации, что было доказано О. И. Черновым и В. С. Черкасовым в лабораторных условиях [1].

Исследования фильтрации и капиллярного равновесия, визуальные и микроскопические наблюдения привели к представлениям о пустотной структуре угля, как трещиновато-пористой блочной среде. Блочная среда имеет иерархический характер. Мелкие блоки вложены в более крупные блоки, а те, в свою очередь, вложены в ещё более крупные блоки. Таким

образом, в пустотной структуре угля наблюдается скейлинг (самоподобие или масштабная инвариантность) на разных масштабных уровнях. Это свойство является серьезным аргументом в пользу причисления ископаемых углей к естественным фракталам [2].

Целью работы является обоснование принципов построения детерминированной математической модели процесса внедрения жидкости в угольный пласт с учётом его фрактальной пустотной структуры. Задачи, решаемые в статье:

- анализ способов гидравлического воздействия на угольные пласты;
- исследования по повышению качества гидравлической обработки угольных пластов;
- получение аналитических решений уравнения пьезопроводности.

Способы гидравлического воздействия на угольные пласты

Применяемые и предложенные к настоящему времени способы нагнетания жидкостей в угольный пласт дают принципиальную возможность предотвращения опасных явлений в шахтах. Так, известно, что пылеобразование при выемке угля практически не происходит, если предварительным увлажнением достигнут равномерный прирост влажности 6-7% [3]. Способствует уменьшению пылеобразования применение водных растворов смачивателя ДБ, хлористого кальция, жидкого стекла и водомасляной эмульсии. При нагнетании различных растворов удается снизить запыленность на 40-50% по сравнению с увлажнением водой. Сkochинским А. А. [3] отмечено снижение газовыделения в атмосферу горных выработок при гидравлической обработке угольного массива. К настоящему времени помимо предварительного увлажнения предложен целый ряд новых способов обработки

с целью борьбы с газом. В результате применения этих способов достигается значительное снижение газовыделения в очистные и подготовительные выработки [4]. Достигнуты положительные результаты в их использовании с целью предотвращения газодинамических явлений, в частности, внезапных выбросов угля и газа.

Вместе с тем, несмотря на большой объем проведенных исследований, эффективность применяемых способов во многих случаях не удовлетворяет требованиям практики. Снижение пылеобразования при предварительном увлажнении даже в комплексе с орошением не позволяет довести запыленность до санитарных норм.

Анализ существующих способов нагнетания жидкостей в угольный пласт с целью борьбы с основными опасностями показывает, что необходимым условием высокой эффективности воздействия является равномерность гидравлической обработки угольного массива. К одной из основных причин недостаточно высокой эффективности уменьшения пылеобразования при предварительном увлажнении относится неравномерность распределения влаги в массиве, вызванная преимущественным движением жидкости по крупным трещинам и приводящая к недостаточному повышению влажности больших блоков угля, тогда как на других участках пласта прирост влажности может превышать требуемое значение.

Авторы [5] обращают внимание на то, что наличие необработанных блоков угля может явиться причиной образования участков с повышенным давлением газа, привести к уменьшению равнопрочности угля, возникновению локальных пиковых концентраций напряжений и, в конечном счете, способствовать развязыванию внезапного выброса. В связи с этим высокая равномерность обработки играет особо важную роль при применении растворов, переходящих в твердое состояние в трещинно-поровом объеме угля.

Единственной причиной неравномерности распространения жидкости при нагнетании является анизотропия фильтрационных и коллекторских свойств пласта, выражающаяся в изменчивости значений коэффициента проницаемости и эффективной пористости по всем направлениям [6]. Анизотропия определяется как природными факторами - наличием систем трещин с различной проницаемостью, сложным строением пластов, тектонической нарушенностью, так и горнотехническими - возникновением в результате ведения горных работ зон опорного давления, повышенного горного давления, разгрузки.

Следует отметить, что разброс значений коэффициента проницаемости в различных направлениях и на различных участках угольного пласта может достигать двух-трех порядков, тогда как эффективная пористость обычно изменяется не более чем в 1,5 – 2 раза. Это позволяет считать основной причиной неравномерности обработки фильтрационную анизотропию.

Значительное влияние на эффективность гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации оказывает глубина пропитки угля жидкостью. Степень проникновения жидкости в тонкопористую структуру угля определяется как физико-химическими свойствами угля и жидкости, так и равномерностью обработки массива в целом. Величина насыщения массива, равномерность распределения жидкости и глубина пропитки угля совместно определяют качество обработки пласта. Повышение качества обработки является важным путем повышения эффективности гидравлического воздействия.

Исследования по повышению качества гидравлической обработки угольных пластов

Повышение качества насыщения угля жидкостью является необходимым условием эффективности всех способов гидравлического воздействия на угольный пласт. Исследования, проведенные к настоящему времени для решения этой задачи, направлены на совершенствование технологических схем нагнетания, подбор рабочих жидкостей, разработку способов воздействия, определение рациональных параметров обработки. Значительная часть исследований посвящена созданию и развитию теории движения жидкостей в угольном пласте как специфической фильтрующей среде, разработке на ее основе адекватных физических и математических моделей процессов в системе «угольный пласт – жидкость», позволяющих изучить закономерности фильтрации жидкости в угле, степень влияния свойств системы и параметров обработки на результаты воздействия, разработать рекомендации по определению фильтрационных и коллекторских характеристик массива, технологии и параметров нагнетания.

Все основные виды гидравлического воздействия, существующие в настоящее время, можно разбивать на группы и сравнивать с точки зрения их эффективности, по следующим основным признакам:

- схема расположения скважин;
- вид рабочей жидкости;
- режим внедрения жидкости;
- схема расположения скважин;
- способ внедрения.

Оценку различных вариантов будем производить по их влиянию на качество насыщения массива жидкостью.

Схема расположения скважин определяется их длиной и ориентировкой относительно линии очистного забоя. В настоящее время известны следующие основные разновидности схем:

- шпур, пробуренные перпендикулярно линии очистного забоя;
- короткие скважины, пробуренные перпендикулярно линии очистного забоя или под некоторым углом к ней;
- длинные скважины, пробуренные из подготовительных выработок параллельно линии очистного забоя или под некоторым углом к ней;
- скважины, пробуренные с поверхности или из горных выработок вкрест напластования;
- комбинированные схемы.

Характеристики, параметры и область применения этих схем описаны в литературе достаточно подробно [1].

Рассмотрим их особенности с точки зрения качества обработки угольного массива. Хорошо известно, что длинные скважины, параллельные линии очистного забоя, в этом смысле более предпочтительны, чем короткие скважины и шпур. Эффективность снижения пылеобразования (характеристика, наиболее тесно связанная с качеством обработки) при нагнетании через шпур составляет 50-60%, через короткие скважины - 60-80%, через длинные скважины - 70-90%. Причинами этого являются расположение длинных скважин в зоне, не подверженной влиянию горных работ, и большая длительность контакта жидкости с углем, способствующая более глубокой его пропитке. Эти преимущества, а также независимость работ по нагнетанию через длинные скважины от очистных работ предопределяют их возрастающий удельный вес в предварительном увлажнении угольных пластов.

Применение длинных скважин ограничивается как горно-геологическими и горнотехническими условиями (выдержанность гипсометрии пласта, устойчивость и низкая водопроницаемость пород кровли, столбовые и комбинированные системы разработки), так и отсутствием надежных средств направленного бурения и герметизации скважин. Кроме того, при нагнетании жидкости через длинные скважины могут оставаться необработанными значительные участки пласта площадью в десятки квадратных метров. Такая неравномерность распределения прироста влажности при нагнетании воды отмечается в работе [7]. Разработка способа преодоления фильтрационной анизотропии при нагнетании жидкостей позволит значительно повысить

эффективность и надежность гидродинамического воздействия через длинные скважины.

В работе [8] исследовано распространение воды при нагнетании в пласт через скважины, пробуренные крестообразно напластованию из горных выработок. Результаты показали существенную неравномерность обработки, причем основной прирост влажности наблюдался на контакте пласта с вмещающими породами. В отдельных случаях в самом массиве прироста влажности вообще не было отмечено. Нагнетание жидкостей через скважины, пробуренные с поверхности, используется, в основном, в режиме гидрорасщепления, эта схема несовместима с остальными по режиму воздействия.

Модификации основных технологических схем связаны обычно с изменением угла наклона скважин к линии очистного забоя, места их заложения, изменением длины фильтрующей части, бурением вспомогательных скважин. Так, например, рекомендуется бурение скважин под прямым углом к направлению основной природной трещиноватости, диагональное расположение скважин. Эти схемы, хотя и учитывают в некоторой степени неоднородность фильтрационных характеристик пласта, но не позволяют преодолеть анизотропию в плоскости, перпендикулярной напластованию, и не обеспечивают обработку слабопроницаемых областей. То же самое относится и к предложенным С. Н. Александровым схемам со вспомогательными скважинами и скважинами ограниченной длины с точечным источником. Кроме того, применение всех этих схем повышает трудоемкость бурения, герметизации и нагнетания, усложняет технологию.

Большой объем исследований был направлен на изыскание рабочих жидкостей, способствующих более равномерной обработке массива. Такие жидкости должны обладать высокой смачивающей способностью по отношению к углю, низкой вязкостью, невысокой стоимостью, производиться промышленностью в достаточном количестве, не быть токсичными, не усложнять существенно технологию нагнетания.

Анализ предложенных к настоящему времени разновидностей гидравлического воздействия на угольный пласт позволяет сделать вывод, что существующие способы не позволяют принципиально решить проблему преодоления фильтрационной анизотропии и значительного повышения качества обработки массива. Причинами этого являются либо невысокая эффективность, либо сложность технологии, отсутствие специального оборудования, узкая область применения. Методом, позволяющим существенно увеличить

равномерность распределения жидкости в анизотропном угольном пласте, может стать использование идеи каскадного нагнетания жидкости, основанного на взаимодействии встречных потоков от одновременно работающих скважин.

В связи с этим, задачами дальнейших исследований по повышению качества обработки массива следует считать установление физических предпосылок и принципиальной возможности преодоления фильтрационной анизотропии взаимодействием встречных потоков жидкости, исследование эффективности каскадной обработки в различных условиях, разработку технологии и параметров воздействия, определение рациональной области применения способа. Решение этих задач, в основном, может быть получено методом математического моделирования, позволяющим установить требуемые характеристики при заданных строении пласта и распределении проницаемости, недоступном для достаточно точного определения в натурных условиях, исследовать большое количество вариантов с небольшими трудовыми и материальными затратами. Для обеспечения возможности использования этого метода необходимо осуществить выбор или разработку математической модели, учитывающей специфику анизотропного пласта как фильтрующей среды и взаимодействие встречных потоков жидкости.

Для исследования движения жидкости в угольном пласте с неупорядоченным распределением коэффициента проницаемости в условиях взаимодействия встречных потоков необходима разработка математической модели, учитывающей специфические особенности процессов, происходящих при гидравлическом воздействии на угольный пласт, в первую очередь - конечность скорости движения фронта фильтрации.

В работах [8, 9] рассматриваются процессы гидродинамического воздействия на угольные пласты как основа способа добычи угля и предотвращения газодинамических явлений. К. К. Софийским рассмотрена краевая задача для уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2}.$$

Задача решается на конечных промежутках времени, и рассматривается процесс сброса давления. Аналитически получено решение в виде бесконечного ряда.

Сказанное позволяет сделать вывод о том, что в исследовании процессов и разработки технологии гидравлического воздействия на угольные пласты имеются серьезные

достижения. Вместе с тем, повсеместно отмечается, что применение различных способов нагнетания текучих в угольные пласты на практике не всегда приводит к желаемым результатам: по целому ряду причин не удается использовать в полной мере преимущества конкретного способа. Одним из главных факторов, снижающих эффективность воздействия, как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, является фильтрационная анизотропия угольного пласта, приводящая при его гидравлической обработке к неравномерному распределению жидкости в заданной области. Известно большое количество модификаций схем расположения скважин, рабочих жидкостей, способов нагнетания, направленных на повышение качества обработки массива, однако они принципиально не решают задачу преодоления фильтрационной анизотропии. Кроме того, широкому распространению этих способов препятствуют сложность технологии, необходимость в специальном оборудовании, узкая область применения.

Перспективным путем решения проблемы представляется использование идеи каскадной обработки угольного пласта, заключающейся в преодолении фильтрационной анизотропии взаимодействием встречных потоков жидкости от одновременно работающих скважин. Однако отсутствие к настоящему времени достаточно полной оценки эффективности способа в различных условиях и детальной разработки его технологий и параметров препятствует применению каскадного нагнетания в промышленных масштабах.

Таким образом, анализ результатов теоретических исследований нагнетания текучих в угольный пласт показывает, что к настоящему времени не составлены системы уравнений, описывающие фильтрацию жидкости в массиве, учитывающие конечность скорости движения фронта в пласте с неупорядоченным распределением проницаемости при наличии встречных потоков жидкости и допускающие эффективные методы решения соответствующих задач. Известные закономерности фильтрации в угольных пластах и наличие адекватных моделей для изотропного массива представляют собой реальную основу для разработки требуемой модели с учетом вышеперечисленных особенностей. При наличии такой модели появится возможность исследовать различные технологические схемы нагнетания в любых условиях фильтрации.

Гидравлическое воздействие заключается в принудительном внедрении (нагнетании) жидкости (вещества, обладающего свойством текучести – «текучего») в угольный пласт под давлением, обеспечивающим ее продвижение в

трещиновато-пористом пространстве пласта. На начальном этапе развития и внедрения технологии нагнетания воды были проведены теоретические исследования процесса и разработан ряд методов, позволяющих рассчитывать параметры увлажнения в зависимости от тех или иных факторов.

Теоретической основой принятых решений являются уравнения, полученные аналитическим способом из уравнений движения и неразрывности для жидкости, фильтрующейся в пористой среде.

Уравнение пьезопроводности

В работе [10], обобщающей результаты исследований многих отечественных и зарубежных ученых, дается физическое обоснование и вывод уравнения нелинейно-упругого режима фильтрации

$$\partial P / \partial t = \chi \partial / \partial x_i \{ [1 + \alpha(P - P_0)] \partial P / \partial x_i \}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент пьезопроводности; P – давление; $\alpha = \alpha_k + \alpha_p - \alpha_\mu$, $\alpha_k, \alpha_p, \alpha_\mu$ – коэффициенты изменения проницаемости, пористости, вязкости и плотности, соответственно.

Уравнение (1) может быть положено в основу математической модели процесса внедрения в пласт жидкости [1]. В случае одномерной фильтрации уравнение (1) имеет вид:

$$\partial P / \partial t = \chi \partial / \partial x \{ [1 + \alpha(P - P_0)] \partial P / \partial x \}. \quad (2)$$

В работе [2] для радиальной фильтрации в среде с фрактальной геометрией пустотности сделан вывод уравнения пьезопроводности:

$$\partial P / \partial t = \chi / x^\gamma \partial / \partial x \{ x^\beta \partial P / \partial x \}, \quad (3)$$

где $\gamma = d - 1$, $\beta = d - 1 - \theta = \gamma - \theta$. При $\gamma = 0$, т.е. $d=1$ (одномерная фильтрация) и $x^{-\theta} = 1 + \alpha(P - P_0)$ уравнение (3) принимает вид уравнения (2).

Преобразование уравнения

Уравнение (3) принадлежит к параболическому типу. Проанализируем его с помощью метода разделения переменных. Следуя классическому алгоритму Фурье: $P(x, t) = \varphi(t) \cdot f(x)$, отсюда $P_t' = \varphi' \cdot f$, $P_x' = \varphi \cdot f'$, $P_{xx}'' = \varphi \cdot f''$.

Запишем уравнение (3) в виде:

$$\partial P / \partial t = (\beta x^{\beta-1} \partial P / \partial x + x^\beta \partial^2 P / \partial x^2) \cdot (4)$$

Подставляя найденные производные в уравнения (4), получим:

$$\varphi' \cdot f = (\beta x^{\beta-1} \cdot \varphi \cdot f' + x^\beta \cdot \varphi \cdot f''). \quad (5)$$

Отсюда

$$\varphi'(t) / \varphi(t) = (\beta x^{\beta-1-\gamma} f'(x) + x^{\beta-\gamma} f''(x)) / f(x). \quad (6)$$

Причем $\varphi'(t) / \varphi(t) = \lambda = \text{const}$. Имеем два дифференциальных уравнения:

$$\varphi' = \lambda \varphi, \quad (7)$$

$$\beta x^{\beta-1-\gamma} \cdot f'(x) + x^{\beta-\gamma} \cdot f''(x) = \lambda f(x). \quad (8)$$

Решение уравнения (7) имеет вид:

$$\varphi(t) = e^{\lambda t}. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (8), получим:

$$\beta x^{\beta-1-\gamma} \cdot f'(x) / f(x) + x^{\beta-\gamma} \cdot f''(x) / f(x) = \lambda, \quad (8)$$

далее

$$f'' / f + \beta f' / (x f) = \lambda x^{\gamma-\beta}. \quad (10)$$

Приведение к уравнению Риккати

Выполним подстановку $f' / f = y$, $f' = f y$, $f'' = f y' + f y'$, $f'' / f = f y' / f + y' = y^2 + y'$.

Отсюда имеем уравнение:

$$y' + y^2 + \beta y / x = \lambda x^{\gamma-\beta}. \quad (11)$$

Полученное уравнение (11) является уравнением Риккати, которое не интегрируется в квадратурах (т.е. нахождение его решения не может быть сведено к конечному числу последовательных интегрирований).

Рассмотрим частный случай. Пусть параметры β и γ связаны зависимостью:

$$\gamma - \beta = -2, \text{ т.е. } y' + y^2 + \beta y / x = \lambda x^{-2}. \quad (12)$$

Тогда одно частное решение уравнения (12) можно подобрать, а именно $y_0 = 1/x$. Общее решение уравнения (12) будем искать в виде $y = y_0 + 1/u$, где $u = u(x)$ – неизвестная функция. Подставим предполагаемое решение в уравнение (12):

$$(1/x + 1/u)' + (1/x + 1/u)^2 + \beta(1/x + 1/u)/x = \lambda x^{-2}. \quad (13)$$

Выполняя соответствующие выкладки, получим линейное уравнение:

$$u' - (2 + \beta)u/x = 1. \quad (14)$$

Следуя алгоритму решения линейного уравнения, получим общее решение уравнения (10):

$$u = Cx^{2+\lambda} - x/(1+\lambda). \quad (15)$$

Из такого представления решения $u(x)$, следует, что $\beta = \lambda$, где λ – любое действительное число.

Общее решение уравнения (12) запишется в виде:

$$y = 1/x + 1/u = 1/x + (1+\lambda)/(C(1+\lambda)x^{2+\lambda} - x). \quad (16)$$

Возвращаемся к подстановке $f'/f = y$. Отсюда

$$\int df/f = \int (1/x + (1+\lambda)/(C(1+\lambda)x^{2+\lambda} - x))dx, \quad (17)$$

$$\ln|f| = \ln|x| + \int (1+\lambda)/(C(1+\lambda)x^{2+\lambda} - x)dx. \quad (18)$$

Вычисление интеграла в правой части громоздко, так как результат должен быть получен для любого λ . Поэтому целесообразно подынтегральную функцию разложить в степенной ряд и выполнить интегрирование каждого члена. Такая операция возможна, так как степенной ряд сходится равномерно в своей области сходимости:

$$f = xe^{\int (1+\lambda)/(C(1+\lambda)x^{2+\lambda} - x)dx}. \quad (19)$$

Общее решение уравнения (3):

$$P(x,t) = e^{\lambda t} \cdot xe^{\int (1+\lambda)/(C(1+\lambda)x^{2+\lambda} - x)dx} \quad (20)$$

при $\gamma - \beta = -2$, $\beta = \lambda$, где λ – любое число.

В реальном процессе параметры γ и β могут быть связаны другой зависимостью или быть свободными параметрами. При других значениях параметров γ и β решение уравнения (11) нельзя выразить в квадратурах от элементарных функций.

Решение уравнения с помощью подстановки

Запишем уравнение (10) в виде $f'' + \beta f'/x = \lambda x^{\gamma-\beta} f$. Выполним замену

$$u(x) = f(x)\sqrt{x},$$

где $u(x)$ – новая функция.

Покажем, что такая замена будет оправданной. Находя последовательно производные

$$f' = (2xu' - u)/(2x^{3/2}),$$

$f'' = (4x^2u'' - 4xu' + 3u)/(4x^{5/2})$ и подставляя в уравнение, получим:

$$(4x^2u'' + (4\beta x - 4x)u' + (3 - 2\beta)u)/(4x^2) = \lambda x^{\gamma-\beta}u.$$

Естественно потребовать, чтобы коэффициент при u' был равен нулю и решение искать в виде степенной функции, т.е. $\beta = 1$ и $u = x^k$. Получим уравнение:

$$4k(k-1)x^k + x^k = 4\lambda x^{\gamma+1+k}.$$

Отсюда необходимо потребовать, чтобы $\gamma = -1$. Тогда для k получим уравнение:

$$4k^2 - 4k - 4\lambda + 1 = 0, \quad k_{1,2} = 1/2 \pm \sqrt{\lambda},$$

$$u = x^{1/2 \pm \sqrt{\lambda}}, \quad f = x^{\pm \sqrt{\lambda}}.$$

Тогда решение уравнения (3) запишется в виде: $P(x,t) = e^{\lambda t} x^{\pm \sqrt{\lambda}}$, при $\beta = 1$, $\gamma = -1$, λ – любое действительное число.

Выводы

В данной работе выполнен анализ способов гидравлического воздействия на угольные пласты и проведены исследования по повышению качества гидравлической обработки угольных пластов. С помощью метода разделения переменных выполнен анализ уравнения пьезопроводности для радиальной фильтрации в среде с фрактальной геометрией пустотности угольного пласта. Получены аналитические решения:

1. $P(x,t) = e^{\lambda t} \cdot xe^{\int (1+\lambda)/(C(1+\lambda)x^{2+\lambda} - x)dx}$ при $\gamma - \beta = -2$, $\beta = \lambda$, где λ – любое действительное число.
2. $P(x,t) = e^{\lambda t} x^{\pm \sqrt{\lambda}}$, при $\beta = 1$, $\gamma = -1$, λ – любое действительное число.

Однако, в общем случае, при произвольных параметрах β и γ , аналитические методы решения могут не существовать.

Литература

1. Павлыш, В. Н. Исследование процесса напорной фильтрации жидкости в анизотропной среде методом математического моделирования (на примере увлажнения угольного пласта) / В. Н. Павлыш, И. В. Тарабаева // Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки. – Донецк: ГОУВПО «ДонНУ», 2017. – № 2. – С.75-83.
2. Прогрессивные технологические решения по комплексному освоению ресурсного потенциала угольных месторождений: монография / В. В. Мельник, В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин и др. ; // под общ. ред.

В. В. Мельника, В. Н. Павлыша. - Донецк : ВИК, 2015. – 340с.

3. Применение математического моделирования в системе автоматического управления процессом гидрообработки трещиновато-пористого массива в условиях неопределенности фильтрационных параметров среды / В. Н. Павлыш, А. Дж. Орва // Искусственный интеллект, 2013. - №1(59). – С.140-148.

4. Основные направления повышения технологического уровня и экологичности горного производства при подземной добыче угля с закладкой выработанных пространств шахт: монография / В. В. Мельник, С. С. Гребёнкин, В. Н. Павлыш и др. ; // под общ. ред. С. С. Гребёнкина, В. В. Мельника. - Донецк : ВИК, 2015. – 273 с.

5. Геомеханическое обоснование рациональных технологических решений по управлению состоянием массива горных пород при подземной добыче угля: монография / В. В. Мельник, В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин и др. ; // под общ. ред. В. Н. Павлыша, В. В. Мельника. – Донецк : ВИК, 2015. – 327 с.

6. Математические модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная // Проблемы искусственного интеллекта, 2019. - № 2(13). – С. 4-13.

7. Применение математического модели-

рования в системе автоматизированного проектирования технологии гидравлического воздействия на угольный пласт / В. Н. Павлыш, Г. Б. Перетолчина // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXV междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 10-16 сент. 2018 г. В 2-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2018. - Т. 2. – С. 40-45.

8. Геоэкологические и экономико-математические аспекты обеспечения безопасных технологий угольных комплексов: монография / С. С. Гребёнкин, В. Н. Павлыш, В. Д. Рябичев и др. ; под общ. ред. С. С. Гребёнкина, В. Н. Павлыша. – Луганск : Ноулидж, 2016. – 340 с.

9. Структура системы автоматизированного управления процессом увлажнения угольного пласта / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная // Проблемы горного дела и экологии горного производства: Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. (24-25 апреля 2014 г., г. Антрацит). – Донецк: Донбасс, 2014. – С. 9–15.

10. Совершенствование системы управления процессом гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная, Г. И. Турчанин // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XXIII междунар. науч.- техн. конф. в г. Севастополе 12-18 сент. 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. – С. 64- 67.

Павлыш В. Н., Добровольский Ю. Н., Лазебная Л. А., Бельков Д. В. Математическое моделирование радиальной фильтрации в угольном пласте с учетом его фрактальной пустотной структуры. Предварительная обработка угольных пластов жидкостями и газами является одним из основных средств решения проблемы борьбы с опасными явлениями в шахтах. В данной работе выполнен анализ способов гидравлического воздействия на угольные пласты и проведены исследования по повышению качества гидравлической обработки угольных пластов. С помощью метода разделения переменных выполнен анализ уравнения пьезопроводности для радиальной фильтрации в среде с фрактальной геометрией пустотности угольного пласта. Получены аналитические решения.

Ключевые слова: математическая модель, процесс, уравнение, метод, анализ, структура.

Pavlysh V. N., Dobrovolsky Yu. N., Lazebnaya L. A, Belkov D. V. Mathematical modeling of radial filtration in a coal seam taking into account its fractal void structure. Pre-treatment of coal seams with liquids and gases is one of the main means of solving the problem of combating hazardous phenomena in mines. In this paper, an analysis was made of the methods of hydraulic impact on coal seams and studies were carried out to improve the quality of hydraulic treatment of coal seams. Using the method of separation of variables, an analysis of the piezoconductivity equation for radial filtration in a medium with fractal geometry of the voidness of a coal seam was performed. Analytical solutions are obtained.

Keywords: mathematical model, process, equation, method, analysis, structure.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022
Рекомендуется к публикации профессором Аноприенко А. Я.