

УДК 622.734.001.57

В. Н. Павлыш, Г. Б. Перетолчина

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
83001, г. Донецк, ул. Артёма, 58

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДЕ С НЕЧЁТКО ОПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

V. N. Pavlysh, G.B. Peretolchina

State Educational Institution of Higher Education «Donetsk national technical University», Donetsk city
83001, Donetsk, Artema str., 58

THE MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY PROCESSES IN ENVIRONMENT WITH LEFT CERTAIN PARAMETERS

В. М. Павлиш, Г. Б. Перетолчина

Державна освітня установа вищої професійної освіти «Донецький національний
технічний університет», м. Донецьк
83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ У СЕРЕДОВИЩІ З НЕЧІТКО ВИЗНАЧЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В статье рассматривается задача построения и исследования детерминированной математической модели процесса движения жидкости в анизотропном угольном пласте, который рассматривается как трещиновато-пористая сплошная среда с нечётко определёнными фильтрационными параметрами. В основу модели положены уравнения в частных производных, описывающие режим нелинейно-упругой фильтрации несжимаемой жидкости в сильно сцементированной сплошной среде, фильтрационные параметры задаются как стохастические величины с фиксированным интервалом вариации, компьютерная реализация модели осуществлена с использованием конечно-разностной аппроксимации.

Ключевые слова: математическая модель, процесс, параметр, уравнение, алгоритм.

In the article the task of construction and investigation of determine mathematical model of liquid moving processes in coal seam regards as crack-porous continuous environment with slipshod defined filtration parameters is considered. The model based on particular derivatives equations, describes nonlinear-elastic filtration regime of compress-resist liquid in strength continuous environment, filtration parameters are given as random quantities with fixed variation interval, computer realization made by ending-difference approximation.

Key words: the mathematical model, process, parameter, equation, algorithm.

Розглядається задача побудови і дослідження детермінованої математичної моделі процесу руху рідини в анізотропному вугільному пласті, що розглядається як тріщинувато-пористе середовище з нечітко визначеними фільтраційними параметрами. В основу моделі покладено рівняння в партикулярних похідних, що описують режим нелінійно-пружної фільтрації нестискаємої рідини в сильно зцементованому суцільному середовищі, фільтраційні параметри задаються як стохастичні величини з фіксованим інтервалом варіації, комп'ютерна реалізація моделі проведена з використанням кінцево-різницевої апроксимації.

Ключові слова: математична модель, процес, параметр, рівняння, алгоритм.

Введение

Донецкий угольный бассейн – старейший центр развития угольной промышленности Российской империи, где указом Петра I была начата разведка и добыча каменного угля. Преимущественным способом организации угледобычи на Донбассе является подземная разработка пластовых месторождений [1].

Физически угольный пласт рассматривается как ограниченная сплошная среда, расположенная на значительной глубине от земной поверхности, вследствие чего подверженная давлению вышележащих пород, и характеризующаяся специфическими свойствами. Как объект разработки угольный пласт обладает рядом параметров, значения которых могут быть определены только при непосредственном контакте путем внедрения в его структуру или воздействия на него при подходе горной выработки, при этом исходное природное состояние пласта нарушается. До начала воздействия угольный пласт является «закрытым» объектом, в связи с чем он рассматривается как сильно сцементированная трещиновато-пористая среда с нечётко определёнными параметрами.

В связи с тем, что при разработке угольных пластов проявляется ряд опасных свойств (пылеобразование, газовыделение, внезапные выбросы, самовозгорание), необходимым условием является применение комплекса мероприятий для снижения интенсивности проявления указанных опасных явлений [2]. В системе способов борьбы с основными опасностями при подземной добыче угля важное место занимает способ предварительной гидропневматической обработки пласта.

Актуальность работы

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 [3]. Повышение качества насыщения угля жидкостью является необходимым условием эффективности всех способов гидравлического воздействия на угольный пласт.

Для повышения эффективности воздействия необходимо постоянное совершенствование технологии и параметров процессов, что в свою очередь вызывает необходимость адекватного теоретического обоснования. Ввиду «закрытого» характера объекта воздействия основным методом исследования является математическое моделирование.

В этой связи совершенствование математического аппарата для развития теоретических основ комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты является актуальной научной задачей.

Цель работы – обоснование математической модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт с учётом нестационарного характера внедрения жидкости и нечёткого определения фильтрационных параметров пласта.

Основное содержание работы

В работе [4], обобщающей результаты исследований многих отечественных и зарубежных ученых, дается физическое обоснование и вывод уравнений упругой фильтрации жидкости в глубинных пластах. Анализ литературы показывает, что

именно такой подход дает наиболее надежные результаты, поэтому в данной работе рассматривается возможность применения полученных авторами [4] результатов к построению математической модели процесса движения текучих в угольном пласте.

Исходные физические предпосылки к выводу уравнений

Авторами рассматриваются пористые горные породы, расположенные на большой глубине и находящиеся под нагрузкой вышележащих слоев, анализируются малые возмущения напряженного состояния горной пористой породы, возникающие при нагнетании жидкости в пласт, и предполагается, что кровля и почва пласта идеально жесткие и непроницаемые.

Из анализа теоретических и практических работ следует, что боковые породы можно рассматривать непроницаемыми и идеально жесткими по отношению к угольному пласту. Кроме того, можно ограничиться рассмотрением малых возмущений напряженного состояния пласта при нагнетании.

Как следует из вида уравнений движения и неразрывности для жидкости [4], в них входят скорости движения жидкости и смещений твердых частиц:

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = -\frac{\mu}{k} n_{\Sigma} (w_i - u_i);$$

$$\frac{\partial n_{\Sigma}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} n_{\Sigma} w_i = 0,$$

где P – давление фильтрующейся жидкости;

k – коэффициент гидравлической проницаемости пласта;

n_{Σ} – эффективная пористость пласта;

μ – вязкость рабочей жидкости;

x_i – пространственные координаты;

w_i, u_i – соответственно скорость частиц жидкости и твердой фазы;

t – время.

В цементированных средах деформации переупаковки твердых частиц по величине близки к деформациям изменения объема частиц, при этом можно пренебречь скоростью перемещения твердых частиц по сравнению со скоростью жидкости всюду, кроме уравнений неразрывности. Исследуя эти уравнения и рассматривая фильтрацию капельной жидкости с относительно небольшим (до 10^3 ат) перепадом давлений, авторы [4] получили уравнение нелинейно-упругого режима фильтрации:

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

где $\chi = \frac{k_0}{\mu_0 (n_{\Sigma 0} a_{\rho} + a_m)}$ – коэффициент пьезопроводности;

$$\alpha = a_k + a_{\rho} - a_{\mu},$$

$a_k, a_n, a_{\mu}, a_{\rho}$ – соответственно коэффициенты изменения проницаемости,

пористости, вязкости и плотности.

Полная математическая модель процесса должна содержать комплекс математических зависимостей, на основе которых можно представить ход процесса и рассчитать его параметры. В данном случае для получения математической модели процесса гидродинамического воздействия на пласт уравнение (1) должно быть дополнено начальными и граничными условиями, которые, в свою очередь, опреде-

ляются технологическими схемами и режимами обработки. Значит, постановка задачи исследования и расчета параметров процесса формируется в соответствии с конкретной технологической схемой.

В начальный момент времени $t = 0$ задается распределение давления в области фильтрации:

$$P(x_i, t)|_{t=0} = P_0.$$

На скважине задается режим давления

$$P(x_i, t)|_{x_i=x_i^C} = P_C(t)$$

или темп нагнетания

$$\Phi_{G_C} \frac{k}{\mu} \frac{\partial P(x_i, t)}{\partial n} ds = cq(t)$$

где $P_C(t)$ – давление на скважине;

x_i^C – координаты скважины;

G_C – контур скважины;

$q(t)$ – темп нагнетания;

c – коэффициент, зависящий от размерности.

На границе области фильтрации задается либо давление, если область оконтурена скважинами или выработками, либо условия непроницаемости на контакте с боковыми породами или на «бесконечности» (когда обрабатывается нетронутый массив):

$$P(x_i, t)|_{\Gamma} = P_{\Gamma}$$

или

$$\frac{\partial P(x_i, t)}{\partial n}|_{\Gamma} = 0,$$

где Γ – граница области фильтрации;

P_{Γ} – давление на границе области.

Таким образом, сформулированные задачи исследования параметров процесса гидродинамического воздействия на пласт исчерпывают основные рациональные схемы обработки. Технологические схемы с иным расположением скважин будут являться частными случаями рассматриваемых задач. Дальнейшая работа заключается в математической формулировке каждой из отмеченных задач и решении полученных уравнений.

Уравнение (1) – это нелинейное параболическое уравнение, точное решение которого весьма затруднено. К настоящему времени разработан ряд численных и аналитических методов для приближенного решения уравнений этого типа. Большой вклад в разработку и практическое использование этих методов внесли ученые Института кибернетики с ВЦ АН Узбекистана под руководством проф. Ф. Б. Абуталиева [5].

Исходное уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right]; \quad (2)$$

введем безразмерные (нормированные) переменные:

$$\left. \begin{aligned} p^* &= \frac{P}{P_{\text{хар}}}; \quad P = P_{\text{хар}} p^*; \\ x^* &= \frac{x}{L}; \quad x = Lx^*; \\ k^* &= \frac{k(P)}{k_{\text{хар}}(P)}; \quad k(P) = k_{\text{хар}}(P) \cdot k^*; \\ t^* &= \frac{t}{t_{\text{хар}}}; \quad t = t_{\text{хар}} \cdot t^* \end{aligned} \right\}$$

где $P_{\text{хар}}, k_{\text{хар}}(P), t_{\text{хар}}$ – некоторые характерные значения соответствующих величин (часто максимальные, как, например, в данном случае для x : $x_{\text{хар}} = x_{\text{max}} = L$).

Подставляем полученные переменные в (2):

$$\frac{P_{\text{хар}}}{t_{\text{хар}}} \frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{k_{\text{хар}}(P) P_{\text{хар}}}{L^2} \frac{\partial}{\partial x^*} \left(k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right);$$

Если положить:

$$t_{\text{хар}} = \frac{P_{\text{хар}} L^2}{k_{\text{хар}}(P)},$$

то получится:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right); \quad (3)$$

Как видно, уравнения (3) и (2) различны только в обозначениях, поэтому звездочки (*) можно опустить.

Итак, замена позволяет перейти к нормированным безразмерным переменным, уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right); \quad (4)$$

Таким же преобразованиям подвергаются начальные и граничные условия.

Область, внутри которой нужно отыскать функцию $p(x, t)$, покрывается сеткой, образованной прямыми, параллельными осям координат, а непрерывная функция $p(x, t)$ отыскивается в виде таблицы дискретных ее значений в узлах сетки [6]:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= i \cdot \Delta x; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \\ t_j &= j \cdot \Delta t; \quad j = 1, 2, 3, \dots \\ p(x, t) &\rightarrow \{p(x_i, t_j)\} = \{p_{i,j}\} \end{aligned} \right\}$$

Аппроксимируем производные по неявной четырехточечной схеме [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &\approx \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta t}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) &\approx \frac{k_{i+0,5,j} p_{i+1,j} - (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}) p_{i,j} + k_{i-0,5,j} p_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \end{aligned}$$

Тогда задача сводится к решению системы алгебраических уравнений

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{i+0,5,j} p_{i+1,j} - \left[\frac{\Delta t}{\Delta x^2} (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}) + 1 \right] p_{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{i-0,5,j} p_{i-1,j} = -p_{i,j-1};$$

Решение полученной системы находится методом прогонки [7].

Одномерная постановка задачи дает возможность рассчитывать параметры нагнетания более совершенным методом, чем применявшиеся ранее, в частности, путём построения нормированных решений [3]. Однако такая постановка не дает возможности более глубоко исследовать технологические схемы нагнетания, следовательно, не позволяет найти пути совершенствования схем воздействия.

Поэтому необходимо рассматривать двумерный случай (плоскостная фильтрация).

Уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi_x \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \alpha(p - p_0)) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \chi_y \frac{\partial}{\partial y} \left[(1 + \alpha(p - p_0)) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (5)$$

Начальные и граничные условия формулируются так же, как и в предыдущем случае.

Для решения задачи применяется схема продольно-поперечных смещений (схема Дугласа) [6], [7]. Уравнение представляется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (6)$$

Область определения функции $p(x, y, t)$ покрывается сеткой:

$$x_i = i \cdot \Delta x, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n;$$

$$y_j = j \cdot \Delta y, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m;$$

$$t_k = k \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Каждый шаг по времени осуществляется в два приема.

$$\begin{aligned} 1) \quad \frac{p_{i,j}^{k+0,5} - p_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} &= \frac{1}{\Delta x^2} (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5}) + \\ &+ \frac{1}{\Delta y^2} (k_{i,j+0,5}^k p_{i,j+1}^k - (k_{i,j+0,5}^k + k_{i,j-0,5}^k) p_{i,j}^k + k_{i,j-0,5}^k p_{i,j-1}^k); \\ 2) \quad \frac{p_{i,j}^{k+1} - p_{i,j}^{k+0,5}}{0,5 \cdot \Delta t} &= \frac{1}{\Delta x^2} (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5}) + \\ &+ \frac{1}{\Delta y^2} (k_{i,j+0,5}^{k+1} p_{i,j+1}^{k+1} - (k_{i,j+0,5}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1}) p_{i,j}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1} p_{i,j-1}^{k+1}); \end{aligned}$$

Как следует из физики процесса, основным параметром является коэффициент проницаемости пласта, именно он определяет форму распределения давления внутри обрабатываемой области (в узлах сетки, моделирующей сплошную среду), и здесь следует выделить несколько факторов.

При подготовке пласта к разработке по данным геологоразведки определяют значения параметров (коэффициент проницаемости, эффективная пористость, показатель трещиноватости и др.) на образцах угля, и эти значения принимаются для всей области разработки, т.е. пласт рассматривается как изотропная среда. На рис. 1а представлен результат моделирования для этого случая. Здесь приведено распределение давления в плоскости Oxy после 10 шагов по времени. Область увлажнения до момента достижения жидкостью границ блока имеет форму, близкую к эллипсоидной. На рисунке изображены линии равного давления, линии тока направлены по нормали к ним.

На самом деле структура пласта весьма сложна, и полученные картины фильтрации дают идеализированное представление о характере процесса. При такой форме области воздействия распространение влаги должно происходить равномерно, чего на самом деле не наблюдается.

Практика показывает, что в процессе нагнетания влага распространяется весьма неравномерно, и это отражает реальную картину структуры пласта, которая является в принципе анизотропной сплошной средой с нечётко определёнными параметрами. Следовательно, необходимо так подобрать параметры модели, чтобы получить более реальную картину процесса.

Один из путей подбора таких параметров – задание анизотропии пласта по всей области фильтрации. Поскольку пласт состоит из блоков с разной проницаемостью, пересечен трещинами различного происхождения, то в нем можно выделить некоторые области с различной величиной коэффициента фильтрации, и соответствующим образом задать набор коэффициентов проницаемости. Ввиду того, что выделить на практике такие области, не проникнув в пласт, невозможно, в первом приближении можно задать набор коэффициентов проницаемости хаотично, используя программу генерации случайных чисел. Благодаря этому приёму можно исследовать процесс фильтрации в условиях, более близких к реальным по сравнению со случаем, когда проницаемость осредняется по трем (двум) направлениям.

На рис. 1б приведен результат решения задачи при таком случайном наборе коэффициентов проницаемости. Как видно из результатов моделирования, жидкость распространяется по всему пласту неравномерно, образуются слабо увлажненные участки. При этом жидкость может найти путь фильтрации, по которому быстро выйдет на соседнюю скважину, оставив большие блоки неувлажненными. Обходя эти блоки, жидкость «закупоривает» имеющийся в них метан, а это может привести к образованию зон с высоким содержанием газа под давлением, и увлажнение даст нежелательный эффект в отношении внезапного выброса.



Рисунок 1 – Результаты моделирования процесса нагнетания через одиночную скважину

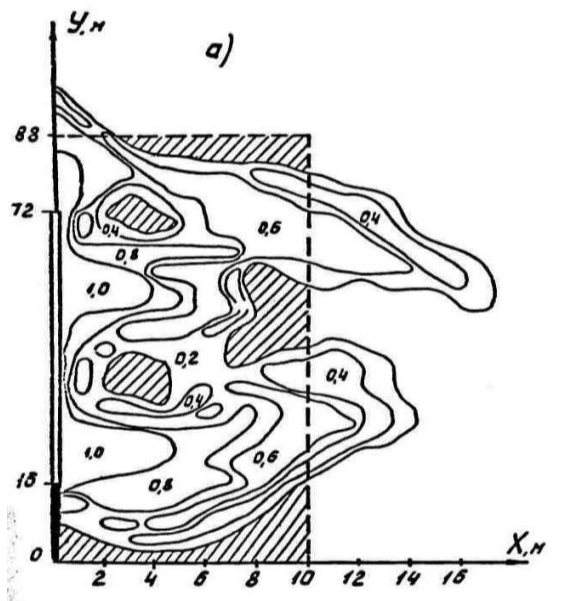


Рисунок 2 – Результат моделирования процесса распределения прироста влажности при нагнетании через одиночную скважину с учётом анизотропии фильтрационных параметров

На рис. 2 приведены результаты моделирования процесса при нагнетании жидкости в условиях задания нечётко определённого коэффициента проницаемости как стохастической величины с заданными пределами $[0,1 - 1,0]$. Такой подход к определению фильтрационной анизотропии угольного пласта является принципиальным отправным моментом к разработке способов преодоления негативного влияния реальной структуры пласта на качество гидрообработки.

Выводы

Обоснована математическая модель процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, базирующаяся на уравнении нелинейной упругой фильтрации несжимаемой жидкости в сильно сцементированной сплошной среде. Отмечено, что параметры сплошной среды, которую представляет угольный пласт, являются нечётко определёнными величинами ввиду «закрытости» объекта.

Показано, что по причине выраженной анизотропии фильтрационных параметров угольного пласта процесс увлажнения при гидравлическом воздействии через одиночную скважину обуславливает высокий уровень вариации прироста влажности в обрабатываемом массиве.

Предложено моделирование реально протекающего процесса увлажнения обеспечивать заданием коэффициента проницаемости пласта как переменной величины стохастического характера.

Выполнена численная реализация моделей методом конечно-разностной аппроксимации.

Предложенные модели и методы их реализации позволяют проводить численное моделирование процессов и решать задачи совершенствования как конструктивных, так и технологических параметров.

К достоинствам данного метода следует отнести возможность исследования процесса при широкой вариации параметров без проведения физических и натурных экспериментов, что удешевляет и ускоряет процесс проектирования новой технологии.

Список литературы

1. Комплексное освоение георесурсов пластовых месторождений: учебное пособие [Текст] / С. С. Гребенкин, В. В. Мельник, В. И. Бондаренко, В. Н. Павлыш и др.; под общей ред. С. С. Гребенкина, В. В. Мельника, В. И. Бондаренко. – Донецк : ВИК, 2013. – 659 с.
2. ДНАОП 1.1.30-1.XX-04. Безопасное ведение горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям (1-я редакция) [Текст]. – К. : Минтопэнерго Украины, 2004. – 268с.
3. Обоснование схем и параметров гидравлической обработки угольных пластов с применением компьютерных технологий [Текст] / В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин, С. Е. Топчий, В. В. Стеблин // Проблемы горного дела и экологии горного производства: Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. (24-25 апреля 2014 г., г. Антрацит). – Донецк : Донбасс, 2014. – С. 29–35.
4. Механика насыщенных пористых сред [Текст] / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. – М. : Недра, 1970. – 336 с.
5. Абуталиев Ф.Б. и др. Методы математического моделирования гидрогеологических процессов [Текст] / Ф. Б. Абуталиев. – М. : Недра, 1972. – 285 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 656 с.
7. Павлыш В. Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: Монография [Текст] / В. Н. Павлыш. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. – 347 с.
8. Павлыш В. Н. Математическое моделирование процессов функционирования специализированных аппаратов конвективного типа [Текст] / В. Н. Павлыш, Е. В. Перинская // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк : ГУ ИПИИ. – 2015. – № 0(1). – С. 89–98.
9. Pavlysh V. N. Modification of computer methods of presentation and analysis of geotechnical information [Text] / V. N. Pavlysh, G. I. Turchanin, O. A. Tikhonova // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк : ГУ ИПИИ. – 2016. – № 1 (2). – С. 15–24.
10. Павлыш В. Н. Проект построения алгоритма классификации текстовых документов [Текст] / В. Н. Павлыш, Е. И. Бурлаева // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк : ГУ ИПИИ. – 2017. – № 4 (7). – С. 24–32.

References

1. *Kompleksnoye osvoyeniye georesursov plastovykh mestorozhdeniy: uchebnoye posobiye* [The complex mastering of stratum deposits geo resources: text-book] / S. S. Grebyonkin, V. V. Melnik, V. I. Bondarenko, V. N. Pavlysh & oth.; red. S.S. Grebyonkin, V.V. Melnik, V.I. Bondarenko, Donetsk: "VIK", 2013, 659 p.
2. ДНАОП 1.1.30-1.XX-04. *Bezopasnoye vedeniye gornyykh rabot na plastakh, sklonykh k gazodynamicheskim yavleniyam* [The safe mine working of gas dynamical events stratum] (1-st edition), K. : Mintopenergo of Ukraine, 2004, 268 p.
3. Pavlysh V.N., Grebyonkin S.S., Topchiy S.E., Steblin V.V. *Obosnovaniye skhem i parametrov gidravlicheskoj obrabotki ugol'nykh plastov s primeneniym komp'yuternykh tekhnologiy* [The coal stratum hydraulic action schemes and parameters foundation with computers technologies]. *Problemy gornogo dela i ekologii gornogo proizvodstva: Mater. IX mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Mining technologies and ecology problems: The Materials of. IX intern. science-pract. conf.] (24-25 of april 2014, t. Antratsit), Donetsk, Donbass, 2014, pp. 29–35.
4. *Mekhanika nasyshchennykh poristykh sred* [The mechanics of satiated porous environment] / V. N. Nikolaevskiy, K. S. Basniev, A. T. Gorbunov, G. A. Zotov, V., Entrails, 1970, 336 p.
5. Abutaliev F.B. & oth. *Metody matematicheskogo modelirovaniya gidrogeologicheskikh protsessov* [The methods of hydrogeological processes mathematical modeling], M., Entrails, 1972, 285p.
6. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of differences schemes], M., Science, 1977, 656 p.
7. Pavlysh V. N. *Razvitiye teorii i sovershenstvovaniye tekhnologii protsessov vozdeystviya na ugol'nyye plasty: Monografiya* [The theory development and technology perfection of coal stratum action processes: Monograph], Donetsk, RVA DonNTU, 2005, 347 p.
8. Pavlysh V. N., Perinskaya E. V. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov funktsionirovaniya spetsializirovannykh apparatov konvektivnogo tipa* [Mathematical modeling of functioning processes of special convective type apparatus]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence, Donetsk, 2015, no. 0(1), pp. 89-98.
9. Pavlysh V. N., Turchanin G. I., Tikhonova O. A. Modification of computer methods of presentation and analysis of geotechnical information. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2016, no. 1 (2), pp. 15–24.
10. Pavlysh V. N., Burlayeva Ye. I. *Proyekt postroyeniya algoritma klassifikatsii tekstovykh dokumentov* [Draft of the algorithm for the classification of text documents] *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2017, no. 4 (7), pp. 24–32.

RESUME

V. N. Pavlysh, G. B. Peretolchina

The Mathematical Modeling of Non-Stationary Processes in Environment with Left Certain Parameters

Background: Physically coal seam is regarded as limited solid environment, located on the large depth of the Earth's surface, as a result, subject to the pressure of the overlying rocks, and characterized by specific properties. How to design coal layer object has a number of parameters, whose values can only be determined by direct contact through the introduction in its structure or exposure to it when approaching the mountain, while the source natural the state of the reservoir is broken, so the seam is "closed" object.

Due to the fact that, in the development of coal seams is manifested a number of hazard, a prerequisite is to apply a set of measures to reduce the intensity of the negative phenomena. In the system of how to combat the main hazards in underground coal mining method important preliminary hydro-pneumatic fracturing processing.

To enhance the effectiveness of impact requires continuous improvement of technology and process parameters, which in turn necessitates adequate theoretical justification. In view of the "closed" nature of the object impacts the main method of research is mathematical modeling.

In this context, improving the mathematical apparatus for development of theoretical bases of complex fluid power impact on coal seams is a topical scientific challenge.

The aim of this work is the justification of mathematical model of hydraulic impact on coal seam with consideration of unsteady nature of the introduction of fluids and fuzzy definition of seepage of reservoir parameters.

Materials and methods: The article discusses the task of constructing and study the deterministic mathematical model of movement of fluid in the anisotropic coal seam, which is seen as a fractured-porous solid environment with enforcement certain filtration parameters. The model is based on the differential equation describing the mode of nonlinear elastic incompressible fluid filtration in a highly compact solid environment, filtration parameters are set as stochastic values with fixed the variation interval. Computer model implemented using finite differential approximation.

A complete mathematical model of process must contain complex mathematical dependencies, which can be used to submit progress and calculate its parameters. In this case, to obtain mathematical models of hydrodynamic stimulation equation should be supplemented with initial and boundary conditions, which in turn defines the technological schemes and processing modes. Means, mission studies, and calculation of process parameters is formed in accordance with the specific technological scheme.

As a result of the analysis tasks process parameters study of hydrodynamic stimulation.

Equation, put in a basis of the mathematical model is a nonlinear parabolic equation, analytical solution which is very difficult, and you need to use numerical methods.

Results: 1-dimensional problem, however, this approach does not provide the possibility to really explore technological schemes of charging, therefore, does not allow you to find ways to improve the impact of schemes, therefore, must be seen a two-dimensional (plane filtering). The solution uses method of horizontal-vertical moving (Douglas scheme)

As can be seen from the physics of the process, the main parameter is the coefficient of permeability, it determines the shape of the distribution of pressure inside the treatment area (grid, simulating a continuous environment).

Practice shows that, in the process forcing moisture is distributed very unevenly, and this reflects real picture structure formation, which is intrinsically anisotropic solid environment to spend certain parameters. Therefore, you should choose the parameters of the model, to get a more realistic picture of the process.

To a first approximation, you can specify a set of coefficients of permeability randomly using random number generation. Thanks to this reception, you can explore the filtering process in conditions closer to reality compared with the case where the permeability of three (two) directions.

Are the results of the modeling process with discharge liquid in the enforcement of certain job conditions of coefficient of permeability as stochastic values with the specified [0.1-1.0]. This approach to the definition of the filter seam anisotropy is a fundamental starting point to develop ways to overcome the negative effects of the real structure of the reservoir quality moisturizing treatment.

Conclusions: Justified mathematical model of hydraulic impact on coal seam based on the equation of nonlinear elastic incompressible fluid filtration in a highly compact solid environment with certain enforcement filtration parameters.

Invited to modeling real wetting process flow to ensure job coefficient permeability as a variable stochastic nature.

Numerical model implementation implemented by the method of differential approximation.

The proposed models and methods of their realization allow numerical modeling processes and meet the challenges of improving as constructive and technological parameters.

The advantages of this method include the opportunity to study the process of with a wide variation of options without spending physical and natural experiments, that reduces the cost and accelerates the process of designing a new technology.

РЕЗЮМЕ

В. Н. Павлыш, Г. Б. Перетолчина

*Математическое моделирование нестационарных процессов
в среде с нечётко определёнными параметрами*

История вопроса: Физически угольный пласт рассматривается как ограниченная сплошная среда, расположенная на значительной глубине от земной поверхности, вследствие чего подверженная давлению вышележащих пород, и характеризующаяся специфическими свойствами. Как объект разработки угольный пласт обладает рядом параметров, значения которых могут быть определены только при непосредственном контакте путем внедрения в его структуру или воздействия на него при подходе горной выработки, при этом исходное природное состояние пласта нарушается, поэтому пласт является «закрытым» объектом.

В связи с тем, что при разработке угольных пластов проявляется ряд опасных свойств, необходимым условием является применение комплекса мероприятий для снижения интенсивности проявления негативных явлений. В системе способов борьбы с основными опасностями при подземной добыче угля важное место занимает способ предварительной гидропневматической обработки пласта.

Для повышения эффективности воздействия необходимо постоянное совершенствование технологии и параметров процессов, что в свою очередь вызывает необходимость адекватного теоретического обоснования. Ввиду «закрытого» характера объекта воздействия основным методом исследования является математическое моделирование.

В этой связи совершенствование математического аппарата для развития теоретических основ комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты является актуальной научной задачей.

Цель работы – обоснование математической модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт с учётом нестационарного характера внедрения жидкости и нечёткого определения фильтрационных параметров пласта.

Материалы и методы. В статье рассматривается задача построения и исследования детерминированной математической модели процесса движения жидкости в анизотропном угольном пласте, который рассматривается как трещиновато-пористая сплошная среда с нечётко определёнными фильтрационными параметрами. В основу модели положены уравнения в частных производных, описывающие режим нелинейно-упругой фильтрации несжимаемой жидкости в сильно сцементированной сплошной среде, фильтрационные параметры задаются как стохастические величины с фиксированным интервалом вариации. Компьютерная реализация модели осуществлена с использованием конечно-разностной аппроксимации.

Полная математическая модель процесса должна содержать комплекс математических зависимостей, на основе которых можно представить ход процесса и рассчитать его параметры. В данном случае для получения математической модели процесса гидродинамического воздействия на пласт уравнение должно быть дополнено начальными и граничными условиями, которые, в свою очередь, определяются технологическими схемами и режимами обработки. Значит, постановка задачи исследования и расчета параметров процесса формируется в соответствии с конкретной технологической схемой.

В результате анализа сформулированы задачи исследования параметров процесса гидродинамического воздействия на пласт.

Уравнение, положенное в основу математической модели, – это нелинейное параболическое уравнение, аналитическое решение которого весьма затруднено, и необходимо использовать численные методы.

Результаты: Одномерная постановка задачи, однако, такая постановка не дает возможности реально исследовать технологические схемы нагнетания, следовательно, не позволяет найти пути совершенствования схем воздействия, поэтому необходимо рассматривать двумерный случай (плоскостная фильтрация).

Для решения задачи применяется метод продольно-поперечных смещений (схема Дугласа).

Как следует из физики процесса, основным параметром является коэффициент проницаемости пласта, именно он определяет форму распределения давления внутри обрабатываемой области (в узлах сетки, моделирующей сплошную среду).

Практика показывает, что в процессе нагнетания влага распространяется весьма неравномерно, и это отражает реальную картину структуры пласта, которая является в принципе анизотропной сплошной средой с нечётко определёнными параметрами. Следовательно, необходимо так подобрать параметры модели, чтобы получить более реальную картину процесса.

В первом приближении можно задать набор коэффициентов проницаемости хаотично, используя программу генерации случайных чисел. Благодаря этому приёму можно исследовать процесс фильтрации в условиях, более близких к реальным по сравнению со случаем, когда проницаемость осредняется по трем (двум) направлениям.

Приведены результаты моделирования процесса при нагнетании жидкости в условиях задания нечётко определённого коэффициента проницаемости как стохастической величины с заданными пределами $[0,1 - 1,0]$. Такой подход к определению фильтрационной анизотропии угольного пласта является принципиальным отправным моментом к разработке способов преодоления негативного влияния реальной структуры пласта на качество гидрообработки.

Заключение. Обоснована математическая модель процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, базирующаяся на уравнении нелинейной упругой фильтрации несжимаемой жидкости в сильно сцементированной сплошной среде с нечётко определёнными фильтрационными параметрами.

Предложено моделирование реально протекающего процесса увлажнения обеспечивать заданием коэффициента проницаемости пласта как переменной величины стохастического характера.

Выполнена численная реализация моделей методом конечно-разностной аппроксимации.

Предложенные модели и методы их реализации позволяют проводить численное моделирование процессов и решать задачи совершенствования как конструктивных, так и технологических параметров.

К достоинствам данного метода следует отнести возможность исследования процесса при широкой вариации параметров без проведения физических и натурных экспериментов, что удешевляет и ускоряет процесс проектирования новой технологии.

Статья поступила в редакцию 19.03.2018.