

УДК 681.518.52:622.53

Л. А. Лазебная

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

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ НАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

L. A. Lazebnaya

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

THE NUMERICAL SOLUTION OF EDGE TASK OF PRESSURE LIQUID FILTRATION IN COAL SEAM

Л. О. Лазебна

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

ЧИСЕЛЬНЕ РІШЕННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ НАПІРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ

Представлены результаты численного решения краевой задачи для уравнения математической физики, положенной в основу детерминированной математической модели процесса гидравлической обработки угольного пласта с целью его насыщения жидкостью для снижения проявления опасных свойств при подземной угледобыче. Предложены вычислительные методы оценки качества воздействия с точки зрения равномерного распределения рабочей жидкости в обрабатываемой зоне пласта.

Ключевые слова: уравнение, краевая задача, математическая модель, процесс, численный метод.

The results of numerical solution of edge task for mathematical physics equation base determined mathematical models of coal seam hydraulic treatment processes with aim of its liquid saturation for dangerous properties reducing during underground mining are represented. The numerical method for treatment quality evaluation as uniform liquid distribution in deal area is proposed.

Key words: equation, edge task, mathematical model, process, numerical method.

Представлені результати чисельного рішення крайової задачі для рівняння математичної фізики, що є основою детермінованої математичної моделі процесу гідралічної дії на вугільний пласт з метою його насичення рідиною для зниження прояву небезпечних властивостей при підземному вуглевидобутку. Пропонуються чисельні методи оцінки якості обробки з точки зору рівномірного розподілу робочої рідини в зоні обробки пласта.

Ключові слова: рівняння, крайова задача, математична модель, процес, чисельний метод.

Актуальность работы. Нагнетание жидкости в угольный пласт применяется как средство борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче. Трудными многими исследователями созданы основы теории и технологии процесса гидравлической обработки угольных пластов, однако многие проблемы в этой области требуют решения.

В частности, стоит задача повышения качества гидравлического воздействия с точки зрения обеспечения равномерного распределения рабочей жидкости в обрабатываемой зоне пласта.

Для решения данной задачи необходимо разработать средства исследования процесса, наиболее эффективным является метод математического моделирования. Поскольку математическая модель процесса базируется на краевых задачах для нелинейных уравнений математической физики, её компьютерная реализация требует применения численных методов.

В этой связи задача разработки алгоритмов численного решения нелинейных краевых задач напорной фильтрации жидкости в угольном пласте является актуальной.

Цель работы – реализация математической модели процесса напорной фильтрации жидкости в анизотропном угольном пласте на основе численного решения краевой задачи для нелинейного уравнения движения жидкости в сплошной среде.

Содержание работы

На рис. 1 приведена обобщённая технологическая схема нагнетания жидкости через скважину, пробуренную по пласту впереди очистного забоя.

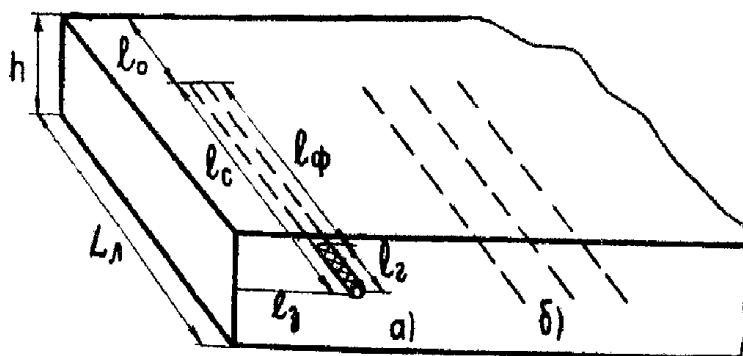


Рисунок 1 – Схема нагнетания жидкости в угольный пласт через скважины

Здесь: h – мощность пласта;

$L_л$ – длина лавы; l_c – длина скважины; l_2 – глубина герметизации;

$l_φ = l_c - l_2$ – длина фильтрующей части скважины;

l_3 – расстояние от скважины до линии забоя (опережение).

Математическая модель основывается на уравнении параболического типа [1].

Для численного решения применяется метод конечных разностей.

Исходное уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия формируются из следующих соображений. При данном расположении скважины (рис. 1) обрабатываемая зона ограничена, т.к. при длительном нагнетании жидкость выйдет на выработки, оконтуривающие массив угля, подвергаемый воздействию через скважину. Поэтому область фильтрации по

оси OX ограничена отрезком $0L$, причем величина L может либо задаваться (когда известны размеры зоны, которую необходимо обработать одной скважиной), либо рассчитываться (когда задано ограниченное время обработки $T_{обр}$).

Следовательно, в качестве начальных условий задаются:

а) давление на скважине в начальный момент

$$P(x, t)|_{t=0} = P(0, 0) = P_c; \quad (2)$$

б) распределение давления на отрезке $(0, L]$ при $t=0$:

$$P(x, t)|_{t=0} = P(x, 0). \quad (3)$$

По смыслу, начальное распределение давления, очевидно, равно давлению газа в пласте:

$$P(x, 0) = P_0.$$

Краевые условия.

На левом конце ($x=0$) задается давление на скважине или темп нагнетания, причем эти величины могут быть либо постоянными, либо являться функциями времени:

$$P(x, t)|_{x=0} = P(0, t) = P_c(t) \quad (4)$$

или

$$\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = cq, \quad (5)$$

где q – удельный расход (расход на единицу площади фильтрующей поверхности);
 c – коэффициент приведения, зависящий от размерности величин, входящих в выражение (5).

На правом конце ($x = L$) условия определяются схемой, а именно:

а) если на расстоянии L от нагнетательной скважины пробурена отточная скважина и исследуется движение жидкости от нагнетательной к отточной скважине, то в точке $x = L$ задается постоянное давление, равное давлению на выработке (обычно считают его равным атмосферному):

$$P(x, t)|_{x=L} = P(L, t) = P_K. \quad (6)$$

Такое же условие задается, если рассматривать фильтрацию в сторону выработки, но при этом надо учитывать влияние опорного давления;

б) если исследовать движение жидкости по мощности пласта в сторону кровли (почвы), то на границе задается условие непроницаемости:

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0. \quad (7)$$

Решая уравнение (1) с начальными условиями, выбранными из (2) – (7) в соответствии с конкретной задачей исследования, можно найти распределение давления на отрезке $[0, L]$ в любой момент времени, что дает возможность рассчитывать параметры соответствующей схемы воздействия на пласт. При этом, как указывается

в [1], [2], решив задачу при некоторых нормированных условиях, можно получить решение большого класса задач, переход к которым осуществляется обратным пересчетом нормированных решений.

Введем безразмерные (нормированные) переменные:

$$\left. \begin{aligned} p^* &= \frac{P}{P_{xap}}; & P &= P_{xap} p^*; \\ x^* &= \frac{x}{L}; & x &= Lx^*; \\ k^* &= \frac{k(P)}{k_{xap}(P)}; & k(P) &= k_{xap}(P) \cdot k^*; \\ t^* &= \frac{t}{t_{xap}}; & t &= t_{xap} \cdot t^* \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

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

Подставляем полученные переменные в (1):

$$\frac{P_{xap}}{t_{xap}} \frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{k_{xap}(P) P_{xap}}{L^2} \frac{\partial}{\partial x^*} \left(k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right). \quad (9)$$

Если положить:

$$t_{xap} = \frac{P_{xap} L^2}{k_{xap}(P)}, \quad (10)$$

то получится:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right). \quad (11)$$

Как видно, уравнения (11) и (1) различны только в обозначениях, поэтому звездочки (*) можно опустить.

Итак, замена (9) позволяет перейти к нормированным безразмерным переменным, уравнение (11) записывается в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (12)$$

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 [3], [4]:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= i \cdot \Delta x; & i &= 0, 1, 2, \dots, n \\ t_j &= j \cdot \Delta t; & j &= 1, 2, 3, \dots \\ p(x, t) &\rightarrow \{p(x_i, t_j)\} = \{p_{i,j}\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Аппроксимируем производные по неявной четырехточечной схеме [4]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta t}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) \approx \frac{k_{i+0,5,j} p_{i+1,j} - (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}) p_{i,j} + k_{i-0,5,j} p_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (15)$$

Приравняв (15) и (14), получим:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{i+0,5,j} p_{i+1,j} - \left[\frac{\Delta t}{\Delta x^2} (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}) + 1 \right] p_{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{i-0,5,j} p_{i-1,j} = -p_{i,j-1}; \quad (16)$$

Решение полученной системы находится методом прогонки [1], [4].

Поскольку коэффициент $k(p)$ является функцией давления, необходимо применять итерационный процесс. В качестве первого приближения задается значение давления на предыдущем шаге по времени, затем итерационный расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

Таким образом, исходя из начальных условий, можно рассчитать распределение давлений в любой момент времени. Критерием окончания может служить момент достижения фронтом фильтрации границы отрезка $0L$. Для контроля за ходом расчета можно использовать метод материального баланса и другие методы [4], [5].

На рис. 2 приведена обобщенная блок-схема алгоритма.

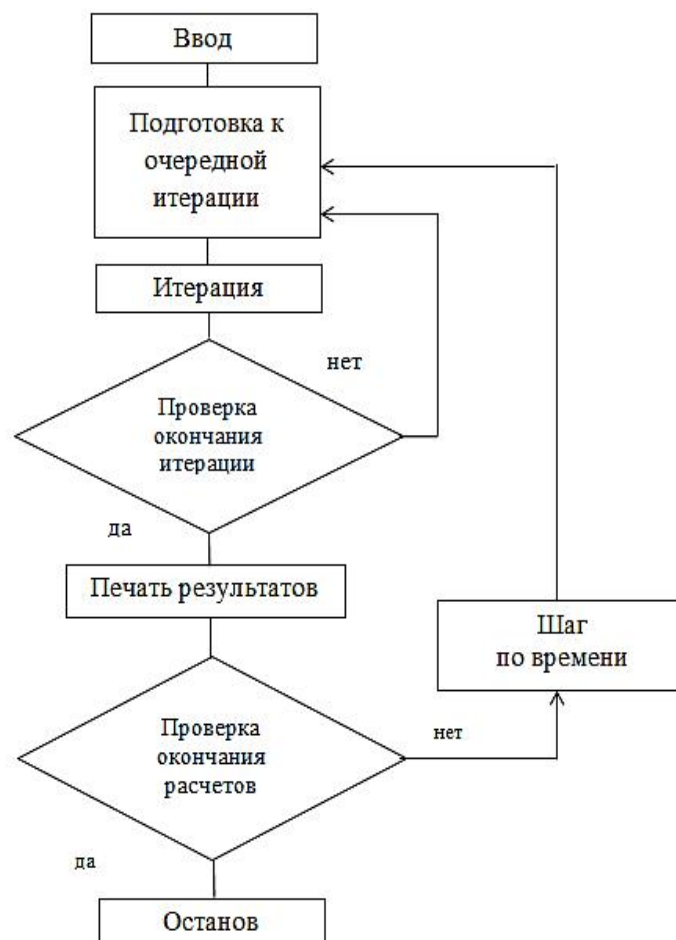


Рисунок 2 – Обобщенная блок-схема алгоритма моделирования процесса фильтрации

Решение задачи в «одномерной» постановке даёт возможность получать любые решения при соответствующей адаптации.

В случае исследования процесса обработки угольного массива в плоскости Oxy необходимо использовать «двумерную» модель.

Для решения задачи математического моделирования процесса гидравлического воздействия на пласт через опережающие скважины в режиме фильтрации при «двумерной» (плоскостной) постановке задачи применяется схема продольно-поперечных направлений (схема Дугласа) [1].

Уравнение представляется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (17)$$

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.

$$1) \quad \frac{p_{i,j}^{k+0,5} - p_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5} \right) + \frac{1}{\Delta y^2} \left(k_{i,j+0,5}^k p_{i,j+1}^k - (k_{i,j+0,5}^k + k_{i,j-0,5}^k) p_{i,j}^k + k_{i,j-0,5}^k p_{i,j-1}^k \right); \quad (18)$$

$$2) \quad \frac{p_{i,j}^{k+0,5} - p_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5} \right) + \frac{1}{\Delta y^2} \left(k_{i,j+0,5}^{k+1} p_{i,j+1}^{k+1} - (k_{i,j+0,5}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1}) p_{i,j}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1} p_{i,j-1}^{k+1} \right); \quad (19)$$

Исследование схем удобно производить с масштабированными (нормированными) переменными.

Поскольку достоверно установить проницаемость пласта в каждой точке не представляется возможным, коэффициент проницаемости в модели может быть задан как случайная величина [1], изменяющаяся в определенных пределах и постоянная на некоторой площади. Разброс значений коэффициента проницаемости, как отмечалось выше, может достигать двух-трех порядков величин. В этой связи был предложен способ технологического решения задачи повышения качества, основанный на применении каскадного принципа, заключающегося в одновременном нагнетании жидкости через соседние скважины с обеспечением интерференции встречных потоков [1].

Выбор критериев оценки эффективности каскадного способа по сравнению с одиночными скважинами производится в соответствии с поставленной целью: повышение равномерности гидравлической обработки пласта.

Равномерность обработки достаточно полно определяется наличием необработанных участков и степенью разброса значений прироста влажности в проектной зоне воздействия. В связи с этим для оценки качества обработки выбраны:

а) коэффициент относительной величины необработанных участков

$$v = \frac{S_H}{S_{ПР}} \cdot 100, \% \quad (20)$$

где S_H – площадь необработанных участков;

$S_{ПР}$ – площадь проектной зоны воздействия;

б) коэффициент вариации относительного прироста влажности, определяемого по давлению жидкости в каждой точке [8]:

$$V_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta W_i - \Delta \bar{W})^2}}{\Delta \bar{W}} \cdot 100, \% \quad (21)$$

где ΔW_i и $\Delta \bar{W}$ – значения прироста влажности соответственно в i -й точке и среднее по обрабатываемой зоне,

$$\Delta W_i = \frac{\Delta W_{расч.i}}{\Delta W_{max}}, \quad (22)$$

где $\Delta W_{расч.i}$ – прирост влажности в i -й точке;

ΔW_{max} – максимальный прирост влажности.

Для оценки эффективности каскадного воздействия будем пользоваться величинами, определяющими относительное уменьшение необработанной площади:

$$\mathcal{E}_s = \frac{S_{H.O} - S_{H.K}}{S_{H.O}} \cdot 100, \% \quad (23)$$

где $S_{H.O}$ и $S_{H.K}$ – площади необработанных участков при нагнетании соответственно через одиночную скважину и каскад;

и уменьшение коэффициента вариации прироста влажности:

$$\mathcal{E}_v = \frac{V_R^0}{V_R^k}, \quad (24)$$

где V_R^0, V_R^k – коэффициенты вариаций соответственно для одиночной скважины и каскада.

Связь между давлением нагнетаемой жидкости и приростом удельного насыщения массива в соответствующих точках определяется кривой согласно [1].

Разработка технологии каскадного нагнетания должна быть направлена на уменьшение степени влияния факторов, снижающих равномерность обработки, с учетом требований минимальной сложности, трудоемкости и использования серийно выпускаемого оборудования.

На основе анализа наиболее распространенных технологических схем и режимов нагнетания, многообразия фильтрационной структуры и строения угольных пластов определены задачи, методика моделирования и критерии оценки эффективности каскадной обработки.

Исследование процесса нагнетания с учетом всех вышеперечисленных факторов дает обоснование принципиальной возможности преодоления фильтрационной анизотропии за счёт взаимодействия встречных потоков рабочей жидкости.

Величинами, оказывающими влияние на характеристики фильтрационного потока, являются: давление жидкости и его градиент, коэффициент проницаемости и пористость пласта, вязкость жидкости, расстояние и время движения. Равномерность распределения жидкости по пласту предполагает равенство скоростей движения ее фронта в каждой точке в один и тот же момент времени.

Вывод

В результате проведенных исследований сформированы детерминированные математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены краевые задачи для уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

Разработаны алгоритмы численного решения поставленных краевых задач и вычислительные методы оценки эффективности процесса и качества гидравлического воздействия на анизотропный угольный пласт.

Список литературы

1. Павлыш В. Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: Монография [Текст] / В. Н. Павлыш. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. – 347 с.
2. Павлыш В. Н. Математические модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы [Текст] / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2019. – № 2(13). – С. 13–21.
3. Павлыш В. Н. Алгоритмы функционирования и технические элементы подсистемы автоматизированного управления процессом нагнетания жидкости в угольный пласт [Текст] / В. Н. Павлыш, И. В. Тарабаева, Л. А. Лазебная // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2017. – № 3(6). – С. 32–39.
4. Павлыш В. Н. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты: монография [Текст] / В. Н. Павлыш, Ю. М. Штерн – Донецк : «ВИК», 2007. – 400 с.
5. Теоретические основы процессов комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты: монография [Текст] / Павлыш В. Н., Гребёнкин С. С., Бондаренко В. И., Агафонов А. В., Штерн Ю. М., Гальченко А. М. ; под общ. ред. Павлыша В. Н. – Донецк: «ВИК», 2006. – 273 с.

References

1. Pavlysh V. N. *Razvitiye teorii i sovershenstvovaniye tekhnologii protsessov vozdeystviya na ugol'nyye plasty: Monografiya* [The development of theory and modification of technology of coal stratum treatment: monograph], Donetsk, RVA DonNTU, 2005, 347 p.
2. Pavlysh V. N., Lazebnaya L. A. *Matematicheskiye modeli i algoritmy upravleniya protsessami dinamicheskogo vozdeystviya na anizotropnyye podzemnyye massivy* [The mathematical models and control algorithms of dynamic action processes on anisotropy underground massifs] *Mezhdunarodnyy retsenziryemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific journal “Problems of artificial intelligence”], Donetsk, PI “IPAI”, 2019, p.13-21.
3. Pavlysh V. N., Tarabayeva I. V., Lazebnaya L. A. *Algoritmy funktsionirovaniya i tekhnicheskiye elementy podsystemy avtomatizirovannogo upravleniya protsessom nagnetaniya zhidkosti v ugol'nyy plast* [The functioning algorithms and technical elements of automatic control subsystem of liquid pumping process in coal seam]. *Mezhdunarodnyy retsenziryemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific journal “Problems of artificial intelligence”], 2017, No. 3(6), Donetsk, PI “IPAI”, 2017, pp. 32-39.

4. Pavlysh V.N., Shtern J.M. *Osnovy teorii i parametry tekhnologii protsessov gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugol'nyye plasty: monografiya* [The base of theory and technological parameters of hydro-pneumatic treatment processes on coal stratum: monograph], Donetsk, "VIK", 2007, 400 p.
5. *Teoreticheskiye osnovy protsessov kompleksnogo gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugol'nyye plasty: monografiya* [The theoretical base of complex hydro-pneumatic treatment processes on coal stratum: monograph], Pavlysh V. N., Grebyonkin S. S., Bondarenko V. I., Agafonov A. V., Shtern J. M., Galchenko A.M., Red. Pavlysh V.N., Donetsk, "VIK", 2006, 273 p.

RESUME

L. A. Lazebnaya

The Numerical Solution of Edge Task of Pressure Liquid Filtration in Coal Seam

Pumping liquid into the coal seam is used as a means of combating the main hazards in underground coal mining. The task is to improve the quality of hydraulic exposure from the point of ensuring an even distribution of working fluid in the treated area of the reservoir. To solve this problem, it is necessary to develop means of researching the process, the most effective method is mathematical modeling. Since the mathematical model of the process is based on edge tasks for non-linear equations of mathematical physics, its computer implementation requires the use of numerical methods. So, the problem of algorithm elaboration for numerical solution of non-linear edge task of liquid pressure filtration in coal seam is actual.

The purpose of the work – implementation of a mathematical model of the process of liquid pressure filtration in the anisotropic coal seam based on the numerical solution of the edge problem for a non-linear equation of fluid movement in a solid environment.

The mathematical model is based on a nonlinear parabolic equation. The method of end substracts is used for the numerical solution. A technological solution to the problem of quality improvement is proposed, based on the application of the cascading principle of simultaneously pumping liquid through adjacent wells with the interference of oncoming flows. The selection of criteria for assessing the effectiveness of the cascading method compared to single wells is made in accordance with the set goal: to increase the uniformity of hydraulic treatment of the reservoir.

The development of cascading technology should be aimed at reducing the impact of factors that reduce the uniformity of processing, taking into account the requirements of minimal complexity, labor-intensive and the use of mass-produced equipment. The study of the pumping process taking into account all the above factors provides a justification for the fundamental possibility of overcoming filtration anisotropy due to the interaction of oncoming fluid flows.

The development of cascading technology should be aimed at reducing the impact of factors that reduce the uniformity of processing, taking into account the requirements of minimal complexity, labor-intensive and the use of mass-produced equipment. The study of the pumping process taking into account all the above factors provides a justification for the fundamental possibility of overcoming filtration anisotropy due to the interaction of oncoming fluid flows.

As a result of the studies, deterministic mathematical models of the process of hydraulic influence on the coal seam are formed, based on the edge tasks for the equation of non-linear-elastic filtration of liquid in solid Wednesday.

Algorithms of numerical solution of the set edge problems and computational methods of assessing the efficiency of the process and quality of hydraulic impact on the anisotropic coal seam have been developed.

РЕЗЮМЕ

Л. А. Лазебная

Математические модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы

Нагнетание жидкости в угольный пласт применяется как средство борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче. Стоит задача повышения качества гидравлического воздействия с точки обеспечения равномерного распределения рабочей жидкости в обрабатываемой зоне пласта. Для решения данной задачи необходимо разработать средства исследования процесса, наиболее эффективным является метод математического моделирования. Поскольку математическая модель процесса базируется на краевых задачах для нелинейных уравнений математической физики, её компьютерная реализация требует применения численных методов.

В этой связи задача разработки алгоритмов численного решения нелинейных краевых задач напорной фильтрации жидкости в угольном пласте является актуальной.

Цель работы – реализация математической модели процесса напорной фильтрации жидкости в анизотропном угольном пласте на основе численного решения краевой задачи для нелинейного уравнения движения жидкости в сплошной среде.

Математическая модель основывается на нелинейном уравнении параболического типа. Для численного решения применяется метод конечных разностей. Предложен способ технологического решения задачи повышения качества, основанный на применении каскадного принципа, заключающегося в одновременном нагнетании жидкости через соседние скважины с обеспечением интерференции встречных потоков. Выбор критериев оценки эффективности каскадного способа по сравнению с одиночными скважинами производится в соответствии с поставленной целью: повышение равномерности гидравлической обработки пласта.

Разработка технологии каскадного нагнетания должна быть направлена на уменьшение степени влияния факторов, снижающих равномерность обработки, с учетом требований минимальной сложности, трудоемкости и использования серийно выпускаемого оборудования.

Исследование процесса нагнетания с учетом всех вышеперечисленных факторов дает обоснование принципиальной возможности преодоления фильтрационной анизотропии за счёт взаимодействия встречных потоков рабочей жидкости.

В результате проведенных исследований сформированы детерминированные математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены краевые задачи для уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

Разработаны алгоритмы численного решения поставленных краевых задач и вычислительные методы оценки эффективности процесса и качества гидравлического воздействия на анизотропный угольный пласт.

Статья поступила в редакцию 27.01.2020.