

УДК 51-7:004.052:622.53

Л. А. Лазебная

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ С УЧЁТОМ ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЫ ФРОНТА ФИЛЬТРАЦИИ

L. A. Lazebnaya

State Educational Institution of Higher Professional Education «Donetsk National Technical University»
83001, Donetsk, Artyoma str., 58

MATHEMATICAL MODELING OF FLUID MOTION IN THE COAL SEAMS TAKING INTO ACCOUNT THE MOVING BOUNDARY OF THE FILTRATION FRONT

Л. О. Лазебна

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

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУХУ РІДИНИ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ З УРАХУВАННЯМ РУХОМОЇ МЕЖІ ФРОНТУ ФІЛЬТРАЦІЇ

Рассматривается процесс движения жидкости в газонасыщенной среде под внешним давлением. Математическая модель формируется с учётом противодействия наполняющих обрабатываемое пространство газов, что обуславливает появление неравномерного подвижного фронта распространения жидкого агента. Предлагается алгоритм численного решения поставленной краевой задачи.

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

The process of fluid movement in a gas-saturated medium under external pressure is considered. The mathematical model is formed taking into account the counteraction of gases filling the treated space, which causes the appearance of an uneven moving front of the propagation of a liquid agent. An algorithm for the numerical solution of the stated boundary value problem is proposed.

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

Розглядається процес руху рідини в газонасиченому середовищі під зовнішнім тиском. Математична модель формується з урахуванням протидії газів, заповнюючих оброблюваний простір, що викликає появу нерівномірного рухомого фронту поширення рідкого агента. Пропонується алгоритм чисельного рішення поставленої крайової задачі.

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

Актуальность работы. В комплексе средств предотвращения проявлений негативных свойств угольного пласта при подземной угледобыче обязательным мероприятием является предварительное нагнетание жидкости в разрабатываемую зону. Трудями многих исследователей созданы основы теории и технологии процесса гидравлической обработки угольных пластов, однако многие проблемы в этой области требуют решения. В частности, дальнейших исследований требует явление, связанное с наличием в угольном пласте газов, находящихся под давлением, что создаёт сопротивление движению жидкости и обуславливает формирование неравномерной подвижной границы фильтрующей жидкости.

В этой связи тема математического моделирования процесса движения жидкости в угольном пласте с учётом подвижной границы фронта фильтрации является актуальной.

Цель работы – разработка математической модели фильтрации жидкости в угольном пласте с подвижной границей фронта фильтрации и обоснование алгоритма численного решения поставленной задачи.

Основное содержание работы

Как показано в работах ряда авторов [1-3], эффективным методом исследования динамики распространения жидкости в анизотропном угольном пласте для установления закономерностей движения и взаимодействия потоков при нагнетании жидкости является математическое моделирование. К настоящему времени сформированы системы уравнений, позволяющие эффективно решать задачи подобного рода, однако нерешённые вопросы пока остаются. В соответствии с физической сущностью и спецификой процесса движения жидкости в угольном массиве уравнения фильтрации должны удовлетворять следующим условиям:

- неявное вычисление координат фронта движущегося потока жидкости;
- возможность исследования жесткого, упругого и нелинейно-упругого режимов фильтрации;
- наличие эффективного численного метода решения.

Скорость движения фронта фильтрующей жидкости может определяться из системы уравнений:

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha P (W_0 - W), \quad (2)$$

$$P(0, t) = P_c, \quad (3)$$

$$P(x \geq l, t) = 0; W(x \geq l, t) = 0, \quad l = l(t); l(0) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dl}{dt} = - \frac{k}{\mu m} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=l}, \quad (5)$$

где $l(t)$ – положение фронта;

W – прирост влагонасыщения;

W_0 – максимальный прирост влагонасыщения.

Из теории нелинейных параболических уравнений известно, что решение уравнения вида

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \operatorname{div}[\lambda(P) \operatorname{grad} P], \quad (6)$$

$$\lambda(P) = aP^n; \quad n > 0 \quad (7)$$

имеет при нулевом начальном условии конечную скорость распространения возмущения [1-3]. Очевидно, что уравнение (6) с точностью до коэффициента $\lambda(P)$ является уравнением упругой фильтрации жидкости в пористой среде. Предполагая, что зависимость (7) имеет место, специальным подбором коэффициента a и показателя степени n добьемся, чтобы величина этой скорости соответствовала вычисляемой по уравнению (5). Без ограничения общности для упрощения выкладок будем рассматривать задачу в одномерной постановке.

Характерное значение времени находится из уравнения

$$t_{x1} = \frac{x_x^2}{\xi P_x}, \quad (8)$$

где $\xi = \frac{k}{\mu m_g}$;

n_g – эффективная пористость;

P_x – характерное значение давления (давление в некоторой точке вблизи фронта фильтрации);

x_x – расстояние от этой точки до поверхности фронта.

Считая, что уравнение (6) справедливо вблизи контура области, занятой жидкостью, получаем выражение для характерного значения времени:

$$t_{x2} = \frac{x_x^2}{a P_x^n}. \quad (9)$$

Для равенства характерных значений времени достаточно выполнение двух условий:

$$a = \xi; \quad n = 1.$$

Тогда уравнение (6) вблизи контура принимает вид (в одномерной постановке):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \xi \frac{\partial}{\partial x} \left(P \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (10)$$

при условии $\xi = \operatorname{const}$.

Покажем, что скорость движения свободной поверхности движущейся жидкости, получаемая из уравнения (10), соответствует уравнению (5). Запишем уравнение (10) в виде

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\xi}{2} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}. \quad (11)$$

Уравнение (11) по форме аналогично уравнению политропической фильтрации газа:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \rho^{n+1}}{\partial x^2} \quad (12)$$

при $n=1$, для которого Г. И. Баренблаттом [1] получены точные решения типа «бегущей волны»:

$$\rho = \begin{cases} \left\{ \frac{c}{a^2} \left[(ct-x) \frac{n}{n+1} + B \frac{n}{n+1} \right] \right\}^{1/n}, & 0 \leq x \leq ct+B; \\ 0, & x \geq ct+B, \end{cases} \quad (13)$$

где c – скорость распространения переднего фронта газа;

B – постоянная, определяемая из равенства

$$\frac{n}{n+1} \rho^n(0,0) = \frac{c}{a^2} B. \quad (14)$$

Для уравнения (1), (2), принимая условие $P(0,t) = P_x$, получим:

$$B = \frac{P_x \xi}{c} - ct, \quad (15)$$

$$P = \begin{cases} \frac{c}{\xi} \left(\frac{P_x \xi}{c} - x \right), & 0 \leq x \leq \frac{P_x \xi}{c}; \\ 0, & x \geq \frac{P_x \xi}{c}. \end{cases} \quad (16)$$

Дифференцируя (16) по x , получаем выражение для скорости движения фронта:

$$c = -\xi \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (17)$$

совпадающее с уравнением (5).

Уравнение, аналогичное уравнению (10), ранее было получено В. В. Ливенцевым [1], [3] для изотропного пласта, однако не было решено и исследовано ввиду отсутствия точных методов. Уравнение (10) нельзя использовать при исследовании взаимодействия встречных потоков жидкости, а также при наличии водоупоров, так как скорость передачи давления, определяемая уравнением (10), равна скорости движения фронта жидкости. При возникновении преграды движению потока это приведет к слишком медленному росту давления в точке встречи, что справедливо только для безнапорной фильтрации. Поэтому для правильного расчета распределения давления в заполненной области уравнение (10) должно быть объединено с уравнением пьезопроводности [1]. Поскольку уравнение пьезопроводности отличается от уравнения (10) только видом коэффициента, это не повлияет существенно на сложность алгоритма.

Таким образом, переходя к n -мерной постановке, уравнение упругой фильтрации жидкости в анизотропном пласте запишем в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}[\lambda(P) \text{grad} P], \quad (18)$$

$$\lambda(P) = \begin{cases} \xi P, & x_i \geq l_i - \Delta x_i; \\ \chi, & x_i < l_i - \Delta x_i, \end{cases} \quad (19)$$

где i – номер координаты;

Δx_i – некоторая малая величина;

χ – коэффициент пьезопроводности, определяемый согласно [1].

При необходимости исследовать нелинейно-упругий режим, коэффициент χ заменяется, согласно [1] на произведение $\chi(1 + \alpha P)$.

Уравнение (18) решается численно с использованием метода конечных разностей. Применение разностных схем к решению краевых задач для уравнений типа (6), (7) при $n \geq 2$ подробно описано в работах [1], [3], [4]. При использовании этого метода, для решения уравнений (18), (19), величина Δx_i принимается равной шагу сеточной области.

Присоединяя к уравнению (18) начальные и граничные условия, соответствующие различным технологическим схемам и режимам воздействия, получим математическую модель гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации.

Примем в дальнейшем $P = P - P_0$.

Тогда в качестве начального условия можно принять:

$$P(x, y, z, 0) = 0. \quad (20)$$

Наиболее распространенными типами граничных условий являются условия указанные в [1-4].

Задано давление нагнетания (условие I рода):

$$P(\Gamma_c, t) = P_H(t), \quad (21)$$

где Γ_c – координаты скважины в рассматриваемой области.

Обычно на скважине задается режим постоянного давления

$$P_H = \text{const}$$

или темп нагнетания (условие II рода):

$$\frac{k}{\mu} S_c \frac{\partial P(\Gamma_c, t)}{\partial n} = q(t), \quad (22)$$

где S_c – площадь поверхности фильтрующей части скважины.

На скважине может быть задано соотношение между давлением и темпом нагнетания (условие III рода):

$$P(\Gamma_c, t) = f[q(t)], \quad (23)$$

где f – функция, определяющая конкретное соотношение.

На отточных скважинах или оконтуривающих выработках давление равно нулю:

$$P(\Gamma_1, t) = 0, \quad (24)$$

где Γ_1 – координаты отточной скважины или выработки.

На контакте с боковыми породами (при допущении об их непроницаемости) обычно принимается условие отсутствия потока:

$$\frac{\partial P(\Gamma_2, t)}{\partial n} = 0, \quad (25)$$

где Γ_2 – соответствующая граница области.

Более сложным является задание граничных условий при фильтрации в сторону нетронутого массива. В подобных случаях для параболических уравнений задается

либо условие, предполагающее наличие отточной скважины на большом удалении от нагнетательной скважины $\Gamma_{\text{макс}}$:

$$P(\Gamma_{\text{макс}}, t) = 0, \quad (26)$$

где $\Gamma_{\text{макс}}$ – контур, обозначенный скважиной, либо отсутствие потока на произвольной, достаточно удаленной от скважины границе области Γ :

$$\frac{\partial P(\Gamma, t)}{\partial n} = 0 \quad (27)$$

Однако условие (26), в принципе, дает возможность получать аналитические решения [1], [3], [4], но не позволяет использовать численный алгоритм. Поэтому применение этого условия приводит либо к неоправданно завышенным размерам области решения, либо к существенной погрешности, так как при этом нетронутый массив на границе области фактически заменяется обнаженной поверхностью. Условие (27) соответствует наличию водоупора на границе, что ведет к завышенным значениям давления: жидкости. Наиболее правильным будет задание на границе такого потока, который соответствовал бы реальному стоку жидкости в массив за пределами области. Можно с незначительной ошибкой принять, что значение потока на границе исследуемой области является постоянным:

$$\frac{\partial P(\Gamma, t)}{\partial n} = \text{const}. \quad (28)$$

Уравнение (18) с соответствующими конкретной области краевыми условиями из набора (20) – (25), (28) представляет собой математическую модель напорной фильтрации жидкости в угольном пласте.

Для проверки адекватности модели, правильности выбранного метода решения и анализа некоторых режимов производилось исследование полученной модели в следующих направлениях:

- сравнение решений уравнения (18) и уравнения (5) для установления погрешности модели;
- исследование поведения решения при наличии фильтрационной анизотропии;
- исследование решения при различных режимах движения жидкости;
- проверка работы условия (28).

Для решения уравнения (18) выбран конечно-разностный метод, основы которого для нелинейных параболических уравнений с разрывными коэффициентами разработаны акад. А. А. Самарским.

Исследование погрешности модели производилось для одномерной постановки при $P_H = \text{const}$. Сравнение результатов показывает, что погрешность решения уравнения (18) составляет в среднем 15% и обусловлена в основном погрешностью первого временного шага.

Исследование поведения решения при наличии анизотропии, водоупоров и встречных потоков жидкости в одномерной и плоскостной постановке показало, что с достаточной для практики точностью в большинстве случаев пьезопроводность можно учитывать только при отсутствии свободной поверхности фронта движущейся жидкости, т.е. при встрече потока с водоупором или другим потоком. Водоупорами обычно являются почва и кровля пласта при предположении об их непроницаемости.

Тогда выражение (19) можно переписать в виде:

$$\lambda(P) = \begin{cases} \xi P, & l_i < L_i; \\ \chi, & l_i = L_i, \end{cases} \quad (29)$$

где L_i – расстояние от скважины до водоупора или границы встречного потока по первой координате.

Для исследования поведения модели при жестком, упругом и нелинейно-упругом режимах фильтрации варьировались значения коэффициента пьезопроводности χ и коэффициента α . Для различных режимов значения этих коэффициентов были приняты следующими: жесткий режим – $\alpha = 0$; $\chi = 1000$ см²/с (завышенное по сравнению с реальным значение); упругий режим – $\alpha = 0$; $\chi = 200$ см²/с; нелинейно-упругий режим – $\alpha = 0,1$ МПа⁻¹; $\chi = 200$ см²/с.

Результаты расчетов показывают, что разница в скорости движения фронта жидкости при жестком, упругом и нелинейно-упругом режимах фильтрации находится в пределах 10-15%, причем форма кривых распределения давления при упругом и нелинейно-упругом режимах близка к прямой линии. Отсюда следует, что с достаточной для практики точностью может быть принят жесткий режим фильтрации. Однако нестационарность процесса фильтрации жидкости в пласте, вызванная конечностью скорости движения фронта, приводит к тому, что использование уравнения жесткого режима не рационально, поэтому в дальнейшем для описания движения жидкости в угольном пласте рекомендуется применять уравнение (18) с коэффициентом в виде (29).

Решение задачи в одномерной постановке может служить для получения информации о погрешности решений, об изменениях давления по пространству для фиксированных значений времени или во времени в фиксированных точках пространства, однако для исследования физики процесса необходимо переходить к двумерной постановке, чтобы исследовать изменение давления как функции трех координат: $P(x, y, t)$.

Исследование погрешности условия (28) проводилось для одномерного и плоскорадиального случаев. В одномерной постановке применение этого условия практически не приводит к потере точности, поскольку кривая распределения давления по оси X мало отличается от прямой линии. В плоскорадиальном случае распределение давления в любом направлении отличается от прямой, однако, это приводит к заметной погрешности только вблизи границы, и существенно не сказывается на распределении давления во всей области.

Таким образом, напорная фильтрация жидкости в анизотропном угольном пласте при наличии водоупоров и встречных потоков от одновременно работающих скважин удовлетворительно описывается уравнением упругого режима (18) с коэффициентом в виде (29) и краевыми условиями (20) – (25) и (28). Для решения поставленной задачи может быть использован метод конечных разностей.

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.

Обоснованы 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). – Донецк : ГУ ИПИИ, 2019. – С. 13–21.
3. Теоретические основы процессов комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты: монография [Текст] / [Павлыш В. Н., Гребёнкин С. С., Бондаренко В. И. и др.]; под общ. ред. Павлыша В. Н. – Донецк : «ВИК», 2006. – 273 с.
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. 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). – Донецк : ГУ ИПИИ, 2017. – С. 32–39.

References

1. Pavlysh V. N. *Razvitiye teorii i sovershenstvovaniye tekhnologii protsessov vozdeystviya na ugol'nyye plasty* [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 retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific journal "Problems of artificial intelligence"], No. 2(13), Donetsk, PI "IPAI", 2019, p. 13-21.
3. *Teoreticheskiye osnovy protsessov kompleksnogo gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugol'nyye plasty* [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.
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. 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 retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific journal "Problems of artificial intelligence"], 2017, No. 3(6), Donetsk, PI "IPAI", 2017, p. 32-39.

RESUME

L. A. Lazebnaya

Mathematical Modeling of Fluid Motion in the Coal Seams Taking into Account the Moving Boundary of the Filtration Front

In the complex of means for preventing the manifestations of negative properties of the coal seam during underground coal mining, a mandatory measure is the preliminary injection of liquid into the developed zone. The works of many researchers have created

the foundations of the theory and technology of the process of hydraulic processing of coal seams, but many problems in this area need to be solved. In particular, further research is required by the phenomenon associated with the presence of gases under pressure in the coal seam, which creates resistance to the movement of the liquid and causes the formation of an uneven moving boundary of the filtering fluid.

In this regard, the topic of mathematical modeling of the process of fluid movement in a coal seam, taking into account the moving boundary of the filtration front, is relevant.

The purpose of the work – development of a mathematical model of fluid filtration in a coal seam with a moving boundary of the filtration front and substantiation of an algorithm for the numerical solution of the problem.

Mathematical modeling is an effective method for studying the dynamics of fluid propagation in an anisotropic coal seam to establish the patterns of movement and interaction of flows during fluid injection. By now, systems of equations have been formed that make it possible to effectively solve problems of this kind, however, unsolved questions still remain. In accordance with the physical nature and specifics of the process of fluid movement in the coal mass, the filtration equations must satisfy the following conditions:

- implicit calculation of the coordinates of the front of a moving fluid flow;
- the ability to study rigid, elastic and nonlinear elastic filtration modes;
- availability of an effective numerical solution method.

By joining the basic equation of the initial and boundary conditions corresponding to various technological schemes and modes of action, a mathematical model of hydraulic action on a coal seam in a filtration mode is obtained.

The calculation results show that the difference in the velocity of the fluid front under rigid, elastic and nonlinear elastic filtration modes is within 10-15%, and the shape of the pressure distribution curves under elastic and nonlinear elastic modes is close to a straight line. Hence it follows that a strict filtering mode can be adopted with an accuracy sufficient for practice. However, the non-stationarity of the fluid filtration process in the seam caused by the finiteness of the front velocity leads to the fact that the use of the rigid mode equation is not rational, therefore, in the future, it is recommended to apply the basic equation to describe the fluid movement in the coal seam.

The solution of the problem in a one-dimensional formulation can serve to obtain information about the error of solutions, about changes in pressure in space for fixed values of time or in time at fixed points in space, however, to study the physics of the process, it is necessary to go to a two-dimensional formulation in order to study the change in pressure as a function of three coordinates $P(x, y, t)$.

As a result of the research conducted, deterministic mathematical models of the process of hydraulic action on a coal seam have been formed, which are based on boundary value problems for the equation of nonlinear elastic filtration of a liquid in a continuous medium.

Algorithms for the numerical solution of the set boundary value problems and computational methods for assessing the efficiency of the process and the quality of hydraulic action on an anisotropic coal seam are substantiated.

РЕЗЮМЕ

Л. А. Лазебная

Математическое моделирование процесса движения жидкости в угольном пласте с учетом подвижной границы фронта фильтрации

В комплексе средств предотвращения проявлений негативных свойств угольного пласта при подземной угледобыче обязательным мероприятием является предварительное нагнетание жидкости в разрабатываемую зону. Трудями многих исследователей созданы основы теории и технологии процесса гидравлической обработки угольных пластов, однако многие проблемы в этой области требуют решения.

В частности, дальнейших исследований требует явление, связанное с наличием в угольном пласте газов, находящихся под давлением, что создаёт сопротивление движению жидкости и обуславливает формирование неравномерной подвижной границы фильтрующейся жидкости.

Цель работы – разработка математической модели фильтрации жидкости в угольном пласте с подвижной границей фронта фильтрации и обоснование алгоритма численного решения поставленной задачи.

Эффективным методом исследования динамики распространения жидкости в анизотропном угольном пласте для установления закономерностей движения и взаимодействия потоков при нагнетании жидкости является математическое моделирование. К настоящему времени сформированы системы уравнений, позволяющие эффективно решать задачи подобного рода, однако нерешённые вопросы пока остаются. В соответствии с физической сущностью и спецификой процесса движения жидкости в угольном массиве уравнения фильтрации должны удовлетворять следующим условиям:

- неявное вычисление координат фронта движущегося потока жидкости;
- возможность исследования жесткого, упругого и нелинейно-упругого режимов фильтрации;
- наличие эффективного численного метода решения.

Путём присоединения к основному уравнению начальных и граничных условий, соответствующих различным технологическим схемам и режимам воздействия, получается математическая модель гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации.

Результаты расчетов показывают, что разница в скорости движения фронта жидкости при жестком, упругом и нелинейно-упругом режимах фильтрации находится в пределах 10 – 15%, причем форма кривых распределения давления при упругом и нелинейно-упругом режимах близка к прямой линии. Отсюда следует, что с достаточной для практики точностью может быть принят жесткий режим фильтрации. Однако нестационарность процесса фильтрации жидкости в пласте, вызванная конечностью скорости движения фронта, приводит к тому, что использование уравнения жесткого режима не рационально, поэтому в дальнейшем для описания движения жидкости в угольном пласте рекомендуется применять основное уравнение.

Решение задачи в одномерной постановке может служить для получения информации о погрешности решений, об изменениях давления по пространству для фиксированных значений времени или во времени в фиксированных точках пространства, однако для исследования физики процесса необходимо переходить к двумерной постановке, чтобы исследовать изменение давления как функции трех координат: $P(x, y, t)$.

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

Статья поступила в редакцию 29.04.2021.