



ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАВОДНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНЫХ АГЕНТОВ

М.Н.Кравченко*¹, В.В.Кадет¹, В.В.Ярыш¹, Н.Н.Диева^{1,2}, А.Н.Лищук³

¹«РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, Россия;

²«Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия;

³ООО «Управляющая компания «Группа ГМС», Москва, Россия

Percolation Approach to Hydrodynamic Modeling of Flooding Through Active Agents

M.N.Kravchenko*¹, V.V.Kadet¹, V.V.Yarysh¹, N.N.Dieva^{1,2}, A.N.Lishchuk³

¹Gubkin Russian State University (NRU) of Oil and Gas», Moscow, Russia;

²Tyumen State University», Tyumen, Russia;

³Asset Management Company «HMS Group» LLC, Moscow, Russia

Abstract

The success of oil and gas field development is pretty much due to the choice of development technology and methods of operations conducted. The most important thing is correct organization of the process of reservoir fluids displacement with the injection of various displacing agents. The usage of chemical additives can significantly change the nature of displacement. Polymer solutions injections into the productive reservoir is one of the ways to increase the efficiency of flooding. Therefore, the building of mathematical models of the displacement process through chemically active agents allows us to optimize methods of displacement by selecting the appropriate composition of the displacing fluid and appropriate technological scheme of organization process.

Keywords:

Mathematical modeling;
Percolation theory;
Chemical effects;
Displacement efficiency;
Polymer flooding.

© 2020 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Сам процесс фильтрации существенным образом зависит от трех факторов: от свойств твердой матрицы коллектора и его структуры (пористости и проницаемости), свойств насыщающего пористую среду флюида (сжимаемости и вязкости) и взаимодействия твердого каркаса с флюидом (явления смачиваемости). Именно перечисленный набор определяющих параметров используется при математическом имитационном моделировании, основанном на решении дифференциальных уравнений сохранения массы, энергии и уравнения так называемого безынерционного движения - закона фильтрации Дарси.

Организация процесса вытеснения флюида из пористой среды путем закачки вытесняющего агента усложняет задачу за счет разницы свойств вытесняющей и вытесняемой фаз - разных плотностей, вязкостей, свойств смачиваемости. При совместном движении в пористой среде двух и

более фаз главным определяющим фактором становятся угол смачивания – теперь уже на границе 3 фаз (скелета и 2 флюидов) и влияние капиллярного давления на границе вытесняющей и вытесняемой жидкостей.

Основополагающей работой в плане применения теоретических работ к практической разработке месторождений считается монография М.Маскета (1946) [1]. Однако нужно уточнить, что вклад в разработку методов практического инжиниринга группы гидромехаников-исследователей Московского нефтяного института (ныне РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина) возглавляемой А.П.Крыловым (Б.Б.Лапук, Н.М.Николаевский, И.А.Чарный др.) по многим проблемам имеет приоритетный характер [2].

При разработке математических моделей фильтрации в пористой среде с изменяющейся структурой (под воздействием активного фильтра) необходимо учитывать, как меняется пористость и проницаемость пористого скелета. Установление зависимости между этими параметрами является весьма непростой задачей и

*E-mail: dep.ngipg@yandex.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20200100419>

требует подробного изучения для разных типов коллекторов. Исторически используемые модели фиктивного и идеального грунтов позволяют получить формулы связи, однако они имеют весьма ограниченный диапазон применимости и приближенный характер в плане применения к реальным пластовым структурам.

М.Маскет активно поддерживал тезис о независимости коэффициента проницаемости от свойств фильтрующегося флюида [1], который в настоящее время можно принимать только без учета микропроцессов, происходящих в пористой среде (без учета сорбции и десорбции, электрокинетических, осмотических и ионообменных явлений и т.д.). Тем не менее, это представление Маскета до сих пор используется в современных работах по теории фильтрации. Учет явления смачивания, капиллярных, осмотических и ионообменных явлений требует использования более сложных представлений. Одним из таких инструментов можно рассматривать теорию перколяции.

В этой же работе М.Маскета [1] обсуждается зависимость проницаемости от пористости и приводится формула Козени, полученная для фиктивного грунта, состоящего из моношаров при их различной укладке. Другое представление основано на рассмотрении моделей периодических капиллярных трубок. Так для капиллярных трубок одинакового диаметра используется подход Козени-Кармана [3], в котором учитывается удельная поверхность пор, извилистость капилляров. Обобщение формулы Козени-Кармана для различных анизотропных модельных сред, представляющих периодические структуры капилляров разного диаметра и периода укладки, было построено В.М.Максимовым, Н.М.Дмитриевым, В.Н.Николаевским [4]. Для двухфазной фильтрации в анизотропном пласте влияние капиллярных эффектов проявляется существенным образом и должно быть учтено при построении математических моделей [5-6].

Другие более сложные капиллярные модели, например, трехмерная капиллярная сетка с узлами в виде шаров [7] и другие, позволяют рассчитывать зависимость проницаемости от пористости фактически во всем диапазоне. При значениях пористости ниже 10% функционально проницаемость резко падает, то есть для капилляров малого диаметра проницаемость уменьшается фактически до нулевых значений.

Перколяционный подход к определению фильтрационно-емкостных свойств коллектора разработан авторами работ [8-10]. В данной работе применяется перколяционная модель для описания процесса заводнения с использованием полимеров нового поколения.

Математическая модель

Применение полимеров, с одной стороны, позволяет существенным образом поднять вязкость закачиваемого вытесняющего агента, с другой стороны увеличить коэффициент охвата пласта за счет снижения проницаемости водо-

проводящих каналов, что способствует выравниванию профиля вытеснения и, в конечном счете, дает качество вытеснения и повышение добычи углеводородов. При создании модели наиболее сложным является описание способности полимера адсорбироваться на стенках капилляров, за счет чего изменяются фильтрационно-ёмкостные свойства пористой матрицы. Также необходимо учитывать возможность деструкции полимера в процессе фильтрации. В настоящей работе представлена полуэмпирическая математическая модель фильтрации полимерного раствора, учитывающая основные свойства полимера. Модель адаптирована к реальному лабораторному эксперименту на керне, что является существенным ее преимуществом по сравнению с чисто теоретическими моделями. В общем случае модель является трехмерной, трехфазной и неизотермической, базируется на принципах механики гетерогенных сред с элементами теории перколяции. Замыкается подбором полуэмпирических коэффициентов, получаемых из эксперимента на керне, для чего моделируется фильтрация водного раствора полимера и его взаимодействие с поровой матрицей [11].

Для моделирования промышленного эксперимента рассматривается упрощенная гидродинамическая модель, которая описывает процесс одномерной, изотермической фильтрации двухкомпонентной жидкости в пористой среде. То есть в рамках двухфазного представления первая (подвижная) фаза, состоит из двух компонент - воды и полимера, а вторая (неподвижная) фаза - это минеральный скелет, объемная доля которого меняется за счет изменения эффективной пористости при адсорбции полимера. Принимается, что относительные скорости компонент подвижной фазы (скорости диффузии) малы и поэтому близки к скорости продвижения раствора по пористой среде. Модель включает уравнения неразрывности, как для полимерной компоненты (уравнение изменения концентрации полимера), так и для водного раствора, и уравнение движения в форме одномерного закона Дарси. Предполагается, что скорость фильтрации полимерного раствора соответствует скорости фильтрации флюида с изменяющейся по мере движения вязкостью, зависящей от концентрации полимера, при этом плотность водного раствора изменяется несущественно ввиду малости концентрации полимера, а сжимаемость пористой матрицы постоянна (плотность не меняется). Система уравнений записывается в следующем виде [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho_{pw} mc)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{pw} wc)}{\partial x} = -J \\ \frac{\partial(\rho_{pw} m(1-c))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{pw} w(1-c))}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial m}{\partial t} = -\frac{J}{\rho_{rock}} \\ w = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \end{array} \right. \quad (1)$$

где ρ_{piv} – плотность водного раствора полимера; ρ_{rock} – плотность породы; c – концентрация полимера в водном растворе; m – эффективная пористость породы; $w=mv$ – приведенная скорость фильтрации двухкомпонентной подвижной фазы (водного раствора полимера); v – истинная скорость движения; p – давление; k – проницаемость породы; J – интенсивность адсорбции полимера. Система замыкается полуэмпирическими уравнениями для изменения динамической вязкости водного раствора полимера $\mu(c,v)$ в зависимости от концентрации полимера и скорости течения, а также функциональной зависимости для интенсивности адсорбции J .

Для описания изменения пористой матрицы в процессе адсорбции полимера предлагается использовать перколяционный подход [9], когда проницаемость k и пористость m изменяются в соответствии с трансформацией капиллярной системы ядра за счет уменьшения эффективных диаметров капилляров различного размера. Сама капиллярная система моделируется решеткой капилляров, характеризующейся модельной плотностью распределения капилляров по радиусам в виде логнормальной функции, качественно близкой к реальной порометрической кривой:

$$f(r_k) = (\sqrt{2\pi}\sigma_d r_k)^{-1} \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right) - A\right)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (2)$$

$$\left(\frac{z_k - 1}{2}\right)^{-1} \left(1 - \int_0^\infty f(r_k) dr_k\right) + \int_0^\infty \frac{r_{km}^4 - r_k^4}{r_k^4 + \left(\frac{z_k - 1}{2}\right) r_{km}^4} f(r_k) dr_k = 0 \quad (3)$$

$$k = l_k^{-(D-1)} \frac{\pi r_{km}^4}{8} \quad (4)$$

$$m = \frac{z_k \pi}{2 l_k^2} \int_0^\infty r_k^2 f(r_k) dr_k \quad (5)$$

где l_k – характерная длина капилляра; r_k – радиус капилляра; z_k – количество капилляров, выходящих из одного узла; r_{km} – радиус капилляров так называемой эффективной среды [2], рассчитывается на основе уравнения (5) с учетом результатов эксперимента; $f(r_k)$ – функция распределения капилляров по радиусам; D – размерность задачи; r_0 – единичный радиус, определяемый условием равенства математического ожидания безразмерной величине A . На рисунке 1 приведена логнормальная функция распределения, построенная по гистограмме функции плотности распределения пор по радиусам для образца ядра терригенных отложений Самарского месторождения.

При расчёте проницаемости использовался переход от решетки с радиусами капилляров, описываемыми логнормальной функцией распределения (2) к однородной «эффективной решетке», характеризующейся капиллярным радиусом r_m так, чтобы при данном переходе свойства

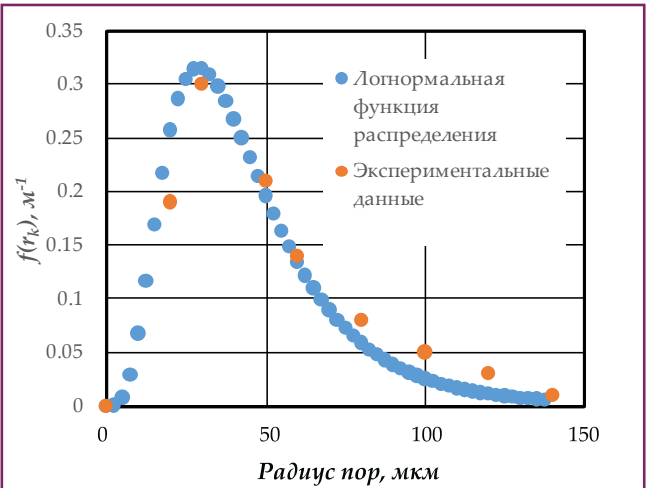


Рис.1. Функция распределения $f(r_k)$ по радиусам пор r_k

«эффективной среды» соответствовали свойствам исходной среды [9]. Данное условие будет соблюдаться, если связь осуществляется в виде уравнения (3). При этом проницаемость определялась в соответствии с законом Пуазейля по формуле (4). Начальная пористость рассчитывалась, как отношение объема, занятого капиллярами к объему всей пористой ячейки (5).

Безразмерные коэффициенты A и σ_d в формуле (2) для функции распределения определялись путем совместного решения уравнений (3)-(5) по начальным значениям проницаемости и пористости.

Изменение радиусов капилляров в результате адсорбции можно описать сдвигом порометрической кривой на величину, равную толщине сорбированного слоя h_r :

$$f(r_k)_{t+\delta t} = f(r_k + h_r)_t \quad (6)$$

$$h_r = 2aP(a) M_d c w \delta t / l_k \quad (7)$$

где a – эффективный радиус полимерной макромолекулы, $P(a)$ – вероятность осаждения частицы, M_d – величина, обратная количеству капилляров капиллярной сетки, l_k – характерная длина капилляра в выбранном типе капиллярной сетки. Интенсивность адсорбции задавалась с учетом осаждения частиц на поверхность капилляра, удельной массы каждой полимерной макромолекулы (ρ_p), скорости фильтрации и концентрации раствора:

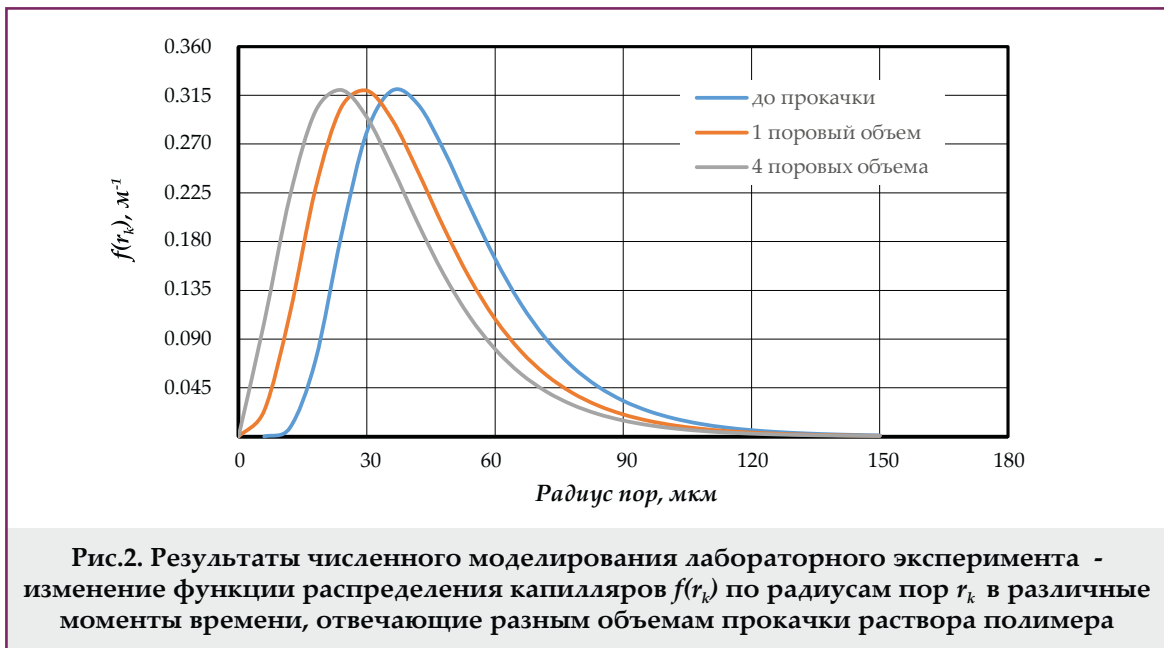
$$J = \frac{P(a) \rho_p w c}{l_k} \quad (8)$$

Для расчёта вероятности осаждения частиц использовались результаты, описанные в работах [12,13]:

$$P(a) = \left(\frac{\gamma a}{r_k}\right)^2 \quad (9)$$

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{v}{v^*}\right) \quad (10)$$

где параметры γ и γ_0 – характеризуют толщины приграничного слоя, из которого полимерные частицы осаждаются на стенках, v – скорость тече-



ния в капилляре, v^* - критическое значение скорости, после которого дальнейшее увеличение скорости значительно влияет на осаждение частиц.

Результаты расчётов

В настоящей работе приведены результаты расчёта параметров процесса фильтрации полимера марки SPIRO P6621. С использованием общей перколяционно-гидродинамической модели (1) – (10) численно рассчитывались параметры экспериментального процесса фильтрации с постоянным расходом полимерного раствора в реальном керне [11,14], при различных начальных исходных данных (пористости и проницаемости реальных образцов керна), разных концентрациях полимерного раствора. В процес-

се расчета подсчитывались в режиме реального времени, как происходит осаждение полимера на стенки капилляров в различных частях образца керна и зависимость всех параметров, и скорость их изменения от количества прокачанных через образец объемов полимерного раствора.

На входе и выходе из образца фиксировались данные по концентрации полимера в растворе. Моделирование эксперимента на основе описанной модели позволило пересчитывать все параметры с учетом количества прокачанных объемов. На рисунке 2 показано изменение функции распределения капилляров по радиусам в различные моменты времени, начиная от исходного, при прокачке полимерного раствора в объеме равном одному поровому объему и при прокач-

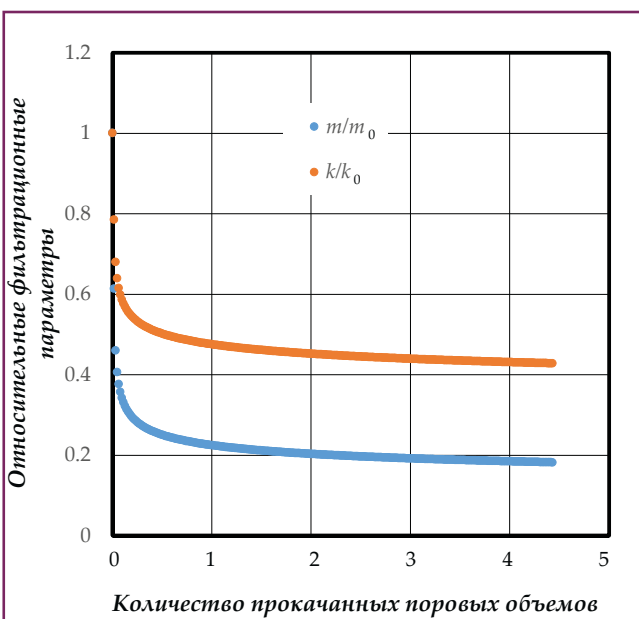


Рис.3. Значения пористости и проницаемости отнесенные к начальным условиям в зависимости от числа прокачанных объемов

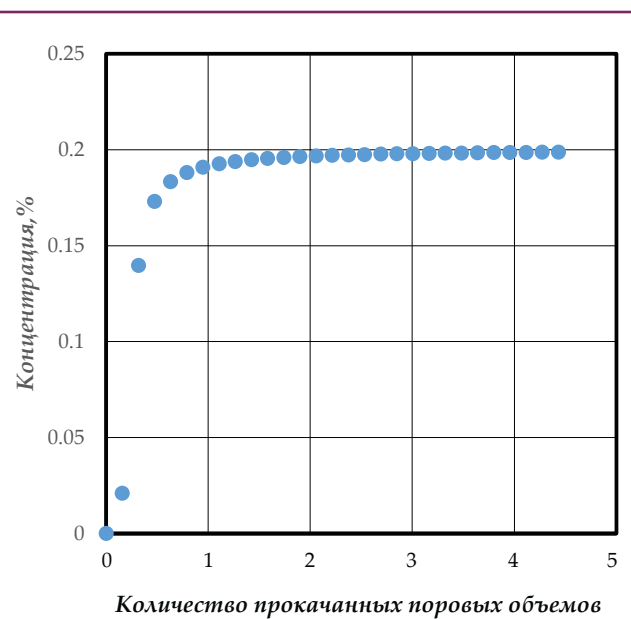


Рис.4. Зависимость концентрации полимерного раствора от числа прокачанных объемов при начальной концентрации 0.2%

ке четырех поровых объемов. Как видим, сорбция полимера на стенках капилляров приводит к смещению кривой распределения в сторону меньших радиусов, что соответствует «закупориванию» наиболее мелких капилляров и уменьшению радиуса всех остальных.

Описанный эффект естественно отражается на изменении пористости и проницаемости образца, что можно наблюдать по графикам относительной пористости m/m_0 и проницаемости k/k_0 на рисунке 3 в зависимости от количества прокачанных объемов. Как видим максимальная сорбцион-

ная активность наблюдается в начальный период взаимодействия полимерных частиц со скелетом.

На рисунке 4 показано как меняется концентрация полимера на выходе из образца в зависимости от длительности эксперимента (в пересчете на число прокачанных объемов): выход концентрации на исходный уровень отражает адсорбция полимера только за период прокачки 2-х поровых объемов. При продолжении закачки в объемах, отвечающих нескольким поровым, осаждение частиц фактически прекращается после насыщения всего образца полимерным раствором.

Выводы

Разработана комплексная перколяционно-гидродинамическая модель фильтрации активных растворов, качественно и количественно описывающая физико-химические процессы, происходящие в реальной пористой среде, о чем свидетельствует хорошее совпадение теоретических вычислений с результатами лабораторного эксперимента на керне. Практическая ценность данной работы состоит в использовании предложенной математической модели для предсказания изменения фильтрационно-ёмкостных характеристик пластов при фильтровании различных химически активных растворов, в том числе при полимерном заводнении, что даст возможность, подбирать оптимальный состав вытесняющего агента, оптимизировать процесс и увеличить эффективность метода повышения нефтеотдачи пласта.

Работа выполнена на базе Тюменского государственного университета при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации проекта по Постановлению Правительства № 218 от 9 апреля 2010 г., по договору № 02. G 25.31.0180 от 01/12/2015 г. АО «Сибнефтемаш» совместно с ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Литература

1. Маскет, М. (2004). Течение однородных жидкостей в пористой среде. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований.
2. Крылов, А.П., Глоговский, М.М., Мирчинк, М.Ф. и др. (2004). Научные основы разработки нефтяных месторождений. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований.
3. Ромм, Е.С. (1985). Структурные модели порового пространства горных пород. Ленинград: Недра.
4. Дмитриев, Н.М. (1996). Тензор коэффициентов проницаемости в капиллярной модели Козени-Кармана. Известия РАН. Механика жидкости и газа, 4, 96-104.
5. Dmitriev, N.M., Kravchenko, M.N., Dmitriev, M.N. (2015). Definition of the capillary number for two phase filtration flows in anisotropic porous media. Doklady Physics, 60(1), 42–45.
6. Dmitriev, M.N., Kravchenko, M.N. (2012, September). Rapoport-leas model for two-phase flow in anisotropic porous media. In 13th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. France, Biarritz.

References

1. Muskat, M. (1946). The flow of homogeneous fluids through porous media. Michigan: J.W.Edwards, Inc.
2. Krylov, A.P., Glogovskiy, M.M., Mirchink, M.F., et al. (2004). Scientific bases of oil field development. Moscow-Izhevsk: Institute for Computer Research.
3. Romm, E.S. (1985). Structural models of pore space in rocks. Leningrad: Nedra.
4. Dmitriev, N. M. (1996). Permeability coefficient tensor in the Kozeny-Carman capillary model. Fluid Dynamics, 31, 560–566.
5. Dmitriev, N.M., Kravchenko, M.N., Dmitriev, M.N. (2015). Definition of the capillary number for two phase filtration flows in anisotropic porous media. Doklady Physics, 60(1), 42–45.
6. Dmitriev, M. N., Kravchenko, M. N. (2012, September). Rapoport-leas model for two-phase flow in anisotropic porous media. In 13th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. France, Biarritz.

7. Gubaidullin, A., Igoshin, D., Khromova, N. (2016). The generalization of the Kozeny approach to determining the permeability of the model porous media made of solid spherical segments. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2(2), 105-120.
8. Selyakov V.I., Kadet V.V. (1996). Percolation models for transport in porous media. *Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers*.
9. Кадет, В.В. (2013). Перколяционный анализ гидродинамических и электрокинетических процессов в пористых средах: Монография. *Москва: Инфра-М*.
10. Kadet, V. V., Galechyan, A. M. (2014). Percolation modeling of relative permeability hysteresis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 119, 139-148.
11. Тихонов, Д. В., Кравченко, М. Н., Ярыш, В. В. (2017). Численное и экспериментальное исследование эффективности использования жидкостей на полимерной основе для интенсификации добычи углеводородов /кн.: Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. *Москва: ИПНГ РАН*.
12. Gruesbeck, C., Collins, R. E. (1982). Entertainment and deposition of the fine particles in porous media. *SPE Journal*, 22(6), 847.
13. Синайский, Э. Г. (1997). Гидродинамика физико-химических процессов. *Москва: Недра*.
14. Бондаренко, А.В. (2017). Обоснование технологии полимерного заводнения для увеличения нефтеотдачи пластов в условиях высокой минерализации пластовых и закачиваемых вод. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. *Москва: Институт проблем нефти и газа РАН*.
7. Gubaidullin, A., Igoshin, D., Khromova, N. (2016). The generalization of the Kozeny approach to determining the permeability of the model porous media made of solid spherical segments. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2(2), 105-120.
8. Selyakov V.I., Kadet V.V. (1996). Percolation models for transport in porous media. *Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers*.
9. Kadet, V.V. (2013). Percolation analysis of hydrodynamic and electrokinetic processes in porous media. *Monograph. Moscow: Infra-M*.
10. Kadet, V. V., Galechyan, A. M. (2014). Percolation modeling of relative permeability hysteresis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 119, 139-148.
11. Tihonov, D. V., Kravchenko, M. N., Yarysh, V. V. (2017). Chislennoe i eksperimental'noe issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya zhidkostej na polimernoj osnove dlya intensivatsii dobychi uglevodorodov /kn.: Fundamental'nyj bazis innovacionnyh tekhnologij neftyanoy i gazovoj promyshlennosti. *Moskva: IPNG RAN*.
12. Gruesbeck, C., Collins, R. E. (1982). Entertainment and deposition of the fine particles in porous media. *SPE Journal*, 22(6), 847.
13. Sinaisky, E. G. (1997). Hydrodynamics of physico-chemical processes. *Moscow: Nedra*.
14. Bondarenko, A.V. (2017). Obosnovanie tekhnologii polimernogo zavodneniya dlya uvelicheniya nefteotdachi plastov v usloviyah vysokoy mineralizatsii plastovyyh i zakachivaemyh vod. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. *Moskva: Institut problem nefti i gaza RAN*.

Перколяционный подход к гидродинамическому моделированию заводнения с использованием активных агентов

M.N.Kravchenko¹, V.V.Kadet¹, V.V.Yarış¹, N.N.Diyeva^{1,2}, A.N.Lişuk³

¹«РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина», Москва, Россия;

²«Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия;

³ООО «Управляющая компания «Группа ГМС», Москва, Россия

Реферат

Успех процесса разработки месторождений в большой степени обусловлен выбором технологии разработки и методики проводимых операций. Наиболее существенным в этом плане является правильная организация процесса вытеснения пластовых флюидов за счет закачки различных вытесняющих агентов. Использование добавок химических реагентов может существенным образом изменить характер вытеснения. Закачка в продуктивный пласт полимерных растворов является одним из способов повышения эффективности заводнения. Поэтому построение математических моделей процесса вытеснения с использованием химически активных агентов, позволяет оптимизировать методику вытеснения путем подбора соответствующего состава вытесняющего флюида и технологической схемы организации процесса.

Ключевые слова: математическое моделирование; теория перколяции; химическое воздействие эффективность вытеснения; полимерное заводнение.

Aktiv agentlərdən istifadə etməklə suvurma prosesinin hidrodinamik modelləşdirməsinə perkolyasiya yanaşması

M.N.Kravçenko¹, V.V.Kadet¹, V.V.Yarış¹, N.N.Diyeva^{1,2}, A.N.Lişuk³

¹İ.M.Qubkin adına Rusiya Dövlət Neft və Qaz Universiteti, Moskva, Rusiya;

²Tyumen Dövlət Universiteti, Tyumen, Rusiya;

³«Qruppa GMS» İdarəedici şirkət» MMC, Moskva, Rusiya

Xülasə

Yataqların işlənməsi prosesinin müvəffəqiyyəti işləmə texnologiyasının və aparılan əməliyyatlar metodikasının seçilməsindən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır. Bu baxımdan müxtəlif sıxışdırıcı agentlərin vurulması hesabına lay flüidlərinin sıxışdırılması prosesinin düzgün təşkil edilməsi ən əhəmiyyətli məsələdir. Kimyəvi reagentlərin əlavələrindən istifadə edilməsi sıxışdırmanın xarakterini əhəmiyyətli şəkildə dəyişə bilər. Məhsuldar laya polimer məhlulların vurulması suvurmanın səmərəliliyinin artırılması üsullarından biridir. Buna görə kimyəvi aktiv agentlərdən istifadə etməklə aparılan sıxışdırma prosesinin riyazi modellərinin qurulması sıxışdırıcı flüidin müvafiq tərkibinin və prosesin təşkilinin texnoloji sxeminin seçilməsi yolu ilə sıxışdırma metodikasını optimallaşdırmağa imkan verir.

Açar sözlər: riyazi modelləşdirmə; perkolyasiya nəzəriyyəsi; kimyəvi təsir; sıxışdırmanın səmərəliliyi; polimerlərin laya vurulması.