

Кирилл Юрьевич САМСОНОВ¹
Александр Павлович ШЕВЕЛЕВ²

УДК 532

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОДОПРИТОКА

¹ студент 1 курса магистратуры,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
sams-kirill@yandex.ru

² кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры моделирования
физических процессов и систем,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
alexandershevelev@mail.ru

Аннотация

В представленной работе рассматривается построение математической модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет адсорбции растворенного вещества в воде.

Цель исследования заключается в рассмотрении изменения поведения пористости пласта и водонасыщенности. Для достижения данной цели работа строилась в три этапа. Первый этап заключался в решении уравнения Баклея–Левретта методом контрольного объема. Также в это уравнение была добавлена модель, учитывающая одновременно кольматацию (оседание частиц) и суффозию (вымывание частиц) пористого скелета.

Вторым этапом являлось написание программного кода для данной численной модели. Заключительным этапом исследования являлось проведение расчета, и на основе

Цитирование: Самсонов К. Ю. Методика определения технических параметров ограничения водопритока / К. Ю. Самсонов, А. П. Шевелев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 2. С. 121–130.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

полученных результатов были построены тестовые графики. Такая модель актуальна для прогнозирования темпов добычи трудно извлекаемых запасов нефти в пластах с ярко выраженной неоднородностью и может быть применима не только в нефтегазовой сфере деятельности — в частности, определение срока службы бытовых фильтров также является задачей фильтрации с учетом изменения пористого скелета фильтрующего элемента и позволяет более точно прогнозировать срок его службы.

Методическую основу данной статьи составили труды отечественных (К. С. Басниев, А. М. Власов, И. Н. Кочин, В. М. Максимов, Н. Е. Леонтьев, В. П. Захаров, Т. А. Исмагилов, А. Г. Телин, М. А. Силин) и зарубежных ученых (Ю-Шу Ву, Карстен Пруесс, З. К. Чен, Тормод Э. Йохансен, Лесли Э. Джеймс, Лю Сяолун).

Ключевые слова

Водоприток, уравнение Баклея–Левретта, метод контрольного объема, кольматация, суффозия.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

В связи с проектированием и анализом нефтяных и газовых месторождений приходится исследовать совместное течение в пористой среде нескольких жидкостей, таких как вода, нефть и газ, которые представляют собой не смешивающиеся обособленные фазы. В Западной Сибири чаще всего встречаются многослойные неоднородные пласты. В процессе их эксплуатации происходит обводнение высокопродуктивного пласта, которое приводит к циркуляции нагнетаемой воды. Тем самым в других пластах-коллекторах нефть остается не извлеченной или добывается, но медленно. Решением данной проблемы является ограничение притока вод, т. е. выведение обводненного коллектора из разработки.

Применяемые технологии ограничения водопритока подразделяются на селективные и неселективные. Неселективными называются методы, использующие материалы, которые независимо от насыщенности среды нефтью, водой и газом образуют экран, не разрушающийся со временем в пластовых условиях [3]. Основная их цель — точное выделение обводненного интервала и исключение проницаемости продуктивной нефтенасыщенной части пласта. В основном для этих целей используют цементы, пеноцементы, полмерцементы и технические устройства типа разбурываемых пакеров и перекрывающих устройств.

Селективные методы — это методы, использующие материалы, которые закачивают во всю перфорированную часть пласта, при этом образующийся осадок увеличивает фильтрационное сопротивление только в водонасыщенной части пласта, не затрагивая нефтяную ее часть [3]. Селективное воздействие реагентов основывается на различии физико-химических свойств пластовых жидкостей, а также и в особенности от геологического строения продуктивного пласта.

Целью данной работы являлось создание математической модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет абсорбции растворенного вещества в воде. Стоит отметить, что изучением влияния порогового характера процессов вымывания или отложения частиц при движении реагента в пористой среде на структуру фронтов пористости занимался Н. Е. Леонтьев.

Для построения математической модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды решалась плоская задача фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости в неоднородном пласте. Жидкости предполагались несмешивающимися (взаимно нерастворимыми), отсутствовали фазовые переходы, температура и скорость потока постоянные. Концентрация частиц была достаточно мала, так что скорость частиц совпадала со скоростью жидкости, а также не учитывались гравитационные и капиллярные силы. В процессе вытеснения образуется зона совместного течения водяной и нефтяной фаз. Введем следующие обозначения: m — пористость, д. е.; $k_w(S)$, $k_o(S)$ — относительные фазовые проницаемости по воде и нефти соответственно, д. е.; S — водонасыщенность, д. е.; w — скорость потока, м/с; $f(S)$ — функция Баклея–Левверетта, д. е.; t — время, с; Δt — изменение по времени, с; x — координата, м; Δx — ширина половинного контрольного объема, м; γ_1 , γ_2 — коэффициент суффозии и коагуляции соответственно, д. е.; $\text{grad } P$ — депрессия, Па/м; c — концентрация, д. е.; c_* — некоторая постоянная, при которой происходит задержка частиц на скелете, д. е.; G — некоторое значение градиента давления, при котором начинается суффозия, Па/м; η_w , η_o — динамическая вязкость воды и нефти соответственно, Па*с; w_w , w_o — скорость водяной и нефтяной фазы соответственно, м/с; $k(m)$ — проницаемость пористого скелета, м².

Описание фильтрации малоконцентрированных суспензий в рамках механики сплошных сред основано на использовании системы (1), состоящей из уравнений баланса массы частиц суспензий и несущей жидкости, закона Дарси и уравнения, задающего кинетику отложения или срыва частиц [5: 73].

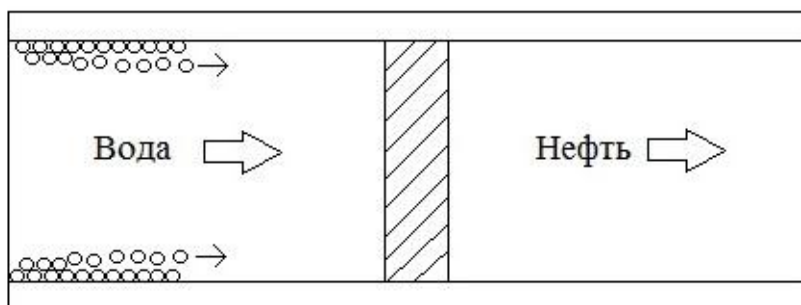


Рис. 1. Схема «поршневого» [2] вытеснения нефти водой с учетом коагуляционных и суффозионных процессов

Fig. 1. The scheme of the “pumping” oil displacement by water based on colmatation and suffusion processes

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(m c)}{\partial t} + \operatorname{div}(c w) = \frac{\partial(m)}{\partial t}, \\ \frac{\partial(1-c)m}{\partial t} + \operatorname{div}((1-c)w) = 0, \\ w = -\frac{k(m)}{\mu} \operatorname{grad} P, \\ \frac{\partial(m)}{\partial t} = f(m, c, |\operatorname{grad} p|). \end{array} \right. \quad (1)$$

Стоит отметить, что уравнения, описывающие оседание частиц на скелет, чаще всего принимают в виде релаксационной модели [5: 73]. Таким образом, скорость оседания частиц на скелет, с одной стороны, возрастает, а с другой — убывает по мере приближения пористости к предельному значению.

Для одновременного учета кольматационных и суффозионных процессов Леонтьевым была предложена модель вида [5]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\gamma_1(m_0 - m)|\operatorname{grad} P| - \gamma_2 c m, \quad \gamma_1, \gamma_2, m_0 = \text{const}, \quad (2)$$

где m_0 — пористость чистого скелета.

Первое слагаемое уравнения (2) в правой части отвечает росту интенсивности суффозии с увеличением локального градиента.

Модель, учитывающая пороговый характер кольматационных процессов, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(m)}{\partial t} = \begin{cases} -\gamma(m - m_{\text{ст}})(c - c_*) & \text{при } c \geq c_*, \\ 0 & \text{при } c < c_*. \end{cases} \quad (3)$$

Модель, учитывающая пороговый характер суффозионных процессов имеет вид

$$\frac{\partial(m)}{\partial t} = \begin{cases} \gamma_1(m_0 - m)(|\operatorname{grad} P| - G) - \gamma_2 c m & \text{при } |\operatorname{grad} P| > G, \\ -\gamma_2 c m & \text{при } |\operatorname{grad} P| \leq G. \end{cases} \quad (4)$$

Задача двухфазной фильтрации без учета капиллярных сил основана на решении уравнения Баклея–Левретта. Для получения дискретного аналога модели расчета динамики фильтрационно-емкостных свойств пласта за счет кольматации и суффозии при «поршневом» вытеснении нефти водой использовался метод контрольного объема и численный метод интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Полагая $w = w_o + w_w = \text{const}$, а также используя закон фильтрации для каждой фазы, можно получить функцию распределения потоков фаз или функцию Баклея–Левретта [6: 125].

Данная функция характеризует долю каждой фазы в общем потоке и определяет полноту вытеснения и характер распределения насыщенности по пласту:

$$f(S) = \frac{\eta_o k_w(S)}{\eta_o k_w(S) + k_o(S)}, \quad \eta_o = \frac{\eta_w}{\eta_o}. \quad (5)$$

Одномерное дифференциальное уравнение в частных производных Баклея–Левретта и его начальные и граничные условия имеют вид

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + w \frac{\partial f(S)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$\text{Н.У.: } t = 0, S(x, 0) = \varphi(x), \quad x > 0,$$

$$\text{Г.У.: } x = 0, S(0, t) = \psi(t), \quad t > 0.$$

Первое условие означает, что в начальный момент времени в пласте имеется некоторое известное распределение насыщенности вытесняющей фазы (воды), описываемое по закону $\varphi(x)$. Второе условие означает, что в момент времени $t > 0$ в пласт закачивается вытесняющая жидкость, насыщенность которой меняется по закону $\psi(t)$ [2: 233].

Для нахождения дискретного аналога уравнения Баклея–Левретта в [6] использовался интегральный закон сохранения массы, согласно которому данное уравнение имеет вид

$$S_i^{n+1} = S_i^n - \frac{w\Delta t}{m\Delta x} (f_{i+1/2}^n - f_{i-1/2}^n). \quad (7)$$

Для нахождения $f_{i+1/2}^n, f_{i-1/2}^n$ использовалась схема «против потока», согласно которой водонасыщенность S постоянна внутри каждого элемента и имеет значение, соответствующее конкретному узлу, лежащему внутри данного элемента, и функция Баклея–Левретта $f(S)$ принимает значение, которое имеет жидкость выше по течению со стороны элемента [6: 130]:

$$\begin{cases} f_{i-1/2} = f_{i-1} & w > 0, \\ f_{i+1/2} = f_i \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_{i-1/2} = f_i & w < 0. \\ f_{i+1/2} = f_{i+1} \end{cases}$$

Дискретный аналог уравнения, описывающий кинетику оседания и срыва частиц, имеет вид

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*) + \gamma_1(m_0 - m_i^n)(|\text{grad } P| - G) - \gamma_2 c_i^n m_i^n) \Delta t, |\text{grad } P| > G \text{ и } c \geq c_*, \quad (9)$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2 c_i^n m_i^n - \gamma_1(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*)) \Delta t, |\text{grad } P| \leq G \text{ и } c \geq c_*,$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - \gamma_2 c_i^n m_i^n \Delta t, |\text{grad } P| \leq G \text{ и } c \leq c_*.$$

Учитывая (8), (9) и $w > 0$, а также линейную зависимость концентрации от водонасыщенности, был получен дискретный аналог модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет абсорбции растворенного вещества в воде, который имеет следующий вид:

$$S_i^{n+1} = S_i^n - \frac{w\Delta t}{m_i^n \Delta x} (f_i^n - f_{i-1}^n),$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*) + \gamma_1(m_0 - m_i^n)(|\text{grad } P| - G) - \gamma_2 c_i^n m_i^n) \Delta t, \quad (10)$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2 c_i^n m_i^n - \gamma_1(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*)) \Delta t,$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - \gamma_2 c_i^n m_i^n \Delta t,$$

$$c_i^{n+1} = S_i^{n+1} c_i^n.$$

По результатам расчета данной модели были получены следующие зависимости.

На Рис. 2. представлена зависимость изменения водонасыщенности (в долях единиц) от координаты (в метрах). На нем видно, что с течением времени профиль вытеснения продвигается вдоль пласта. Скорость продвижения фронта составляет 2,4 м/сут. Также видно, что с ростом времени форма профиля размывается и стремится к линейно монотонной зависимости. Эволюцию фронта вытеснения можно объяснить, как с физической, так и с математической точек зрения. Первая объясняется различием в подвижностях нагнетаемой воды и нефти. Вторая точка зрения объясняется численной диффузией, т. е. с ростом числа математических операций даже при соблюдении условия устойчивости численного решения.

На Рис. 3. приведена зависимость пористости (в долях единиц) от времени (в сутках). Из графика видно, что с течением времени за счет адсорбции происходит оседание твердых частиц на скелет (кольматация), что закономерно изменяет пористость и как следствие проницаемость пористой среды. С ростом

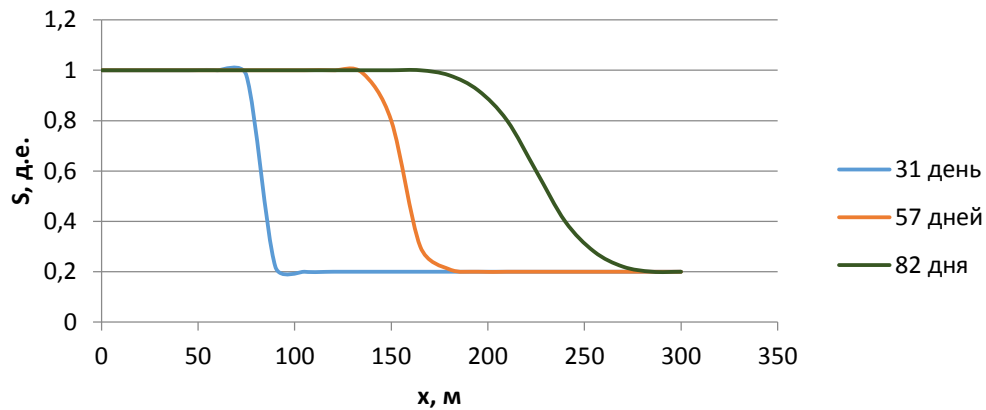


Рис. 2. Распределение водонасыщенности в различные моменты времени

Fig. 2. The distribution of water saturation at different times

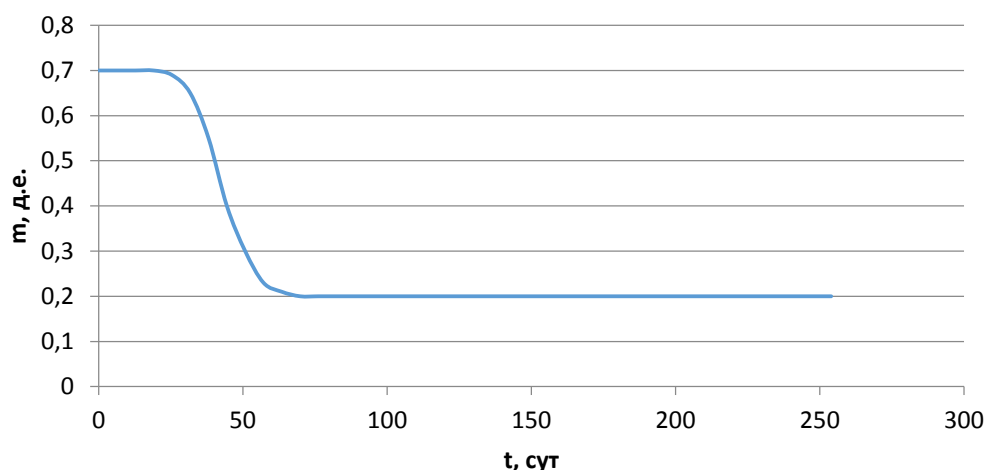


Рис. 3. Зависимость пористости от времени

Fig. 3. The dependence of porosity over time

времени и концентрации растворенного вещества с процессом коагуляции начинает конкурировать суффозия растворенного вещества, т. е. смыв осевших частиц потоком нагнетаемой воды.

С точки зрения теории в определенный момент времени оба конкурирующих процесса должны привести к выравниванию скорости абсорбции и скорости растворения абсорбции данного вещества, и кривая изменения пористости исследуемого образца должна выйти на стационарный участок при соблюдении условия неизменности градиента давления. Однако в силу ограниченности вычислительного времени данный участок кривой не моделировался.

Из Рис. 3 видно, что за интервал времени с 25 до 69 суток пористость образца изменилась с 0,7 до 0,2 д. е.

Таким образом, была построена математическая модель процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет адсорбции растворенного вещества в воде. В ходе расчета были получены тестовые графики. Данная модель является инструментом для получения методики определения основных параметров ограничения притока вод за счет изменения порового скелета твердыми частицами суспензии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басниев К. С. Подземная гидравлика / К. С. Басниев, А. М. Власов, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1986. 303 с.
2. Басниев К. С. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1993. 416 с.: ил.
3. Демахин С. А. Селективные методы изоляции водопритока в нефтяные скважины / С. А. Демахин, А. Г. Демахин. Саратов: Колледж, 2003. 164 с.: ил.

4. Захаров В. П. Нефтепромысловая химия. Регулирование фильтрационных потоков водоизолирующими технологиями при разработке нефтяных месторождений / В. П. Захаров, Т. А. Исмагилов, А. Г. Телин, М. А. Силин. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2010. 225 с.: ил.
5. Леонтьев Н. Е. О структуре фронта пористости при движении суспензии в пористой среде / Н. Е. Леонтьев // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2006. № 5.
6. Максимов М. М. Математическое моделирование процессов разработки нефтяных месторождений / М. М. Максимов, Л. П. Рыбицкая. М.: Недра, 1976. 264 с.
7. Deng L. Capillary Corrections to Buckley-Leverett Flow / L. Deng, M. J. King // SPE Conference Paper. 2015.
8. Johansen T. E. On the Buckley-Leverett Equation with Constant-Pressure Boundary Conditions / T. E. Johansen, L. A. James, L. Xiaolong // SPE Journal Paper. 2016.
9. Sethian J. A. Numerical Solution of the Buckley-Leverett Equations / J. A. Sethian, A. J. Chorin, Paul Concus // SPE Conference Paper. 1983.
10. Wu Y.-S. Buckley-Leverett Flow in Composite Porous Media / Y.-S. Wu, K. Pruess, Z. X. Chen // SPE Advanced Technology Series. 1993. Vol. 1. No 2.

Kirill Yu. SAMSONOV¹
Aleksandr P. SHEVELEV²

METHOD FOR DETERMINING THE TECHNICAL PARAMETERS OF WATER RESTRICTIONS

¹ Post-Graduate Student,
Institute of Physics and Technology,
Tyumen State University
sams-kirill@yandex.ru

² Cand. Sci. (Phys-Math.),
Associate Professor, Department
of Physical Processes and Systems Modeling,
Institute of Physics and Technology,
Tyumen State University
alexandershevelev@mail.ru

Abstract

The paper considers the construction of a mathematical model of the oil displacement by water process taking into account the changes in the porous medium due to the adsorption of the solute in the water. The purpose of the study is to examine the changes in the behavior of reservoir porosity and water saturation. To achieve this objective, the work has been built in three stages. The first stage consists in solving the Buckley–Leverett equation by the control volume method. Also a new model has been added into this equation, which took into account simultaneously the mudding (particles settling) and suffusion (particles washout) of the porous skeleton.

The second stage is the coding for this numerical model. The final stage of the study includes calculations, the results of which allowed building test graphics. Such a model is relevant for predicting the rate of extraction of hard recoverable oil reserves in reservoirs with pronounced heterogeneity, and it can be applied not only in the oil and gas sector activities — in particular, the determination of the service life of household filters as a filtering task with changes of the porous skeleton of the filter element allows more accurate predicting of its service life.

Citation: Samsonov K. Yu., Shevelev A. Sh. 2016. “Method for Determining the Technical Parameters of Water Restrictions”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 2, pp. 121–130.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

The methodological basis for this article can be found in the papers by K. S. Basniev, M. A. Vlasova, I. N. Kochina, V. M. Maksimova, N. E. Leontiev, V. P. Zakharov, T. A. Ismagilov, A. G. Thelin, M. A. Silin, Yu-Shu Wu, Karsten Pruess, Z. X. Chen, Thormod E. Johansen, Lesley A. James, Liu Xiaolong.

Keywords

Water influx, Buckley-Leverett equation, control volume method, mudding, suffusion.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

REFERENCES

1. Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. 1993. Podzemnaya gidromekhanika: Uchebnik dlya vuzov [Underground Fluid Mechanics: University Textbook]. Moscow: Nedra.
2. Basniev K. S., Vlasov A. M., Kochina I. N., Maksimov V. M. 1986. Podzemnaya gidravlika [Underground Hydraulics]. Moscow: Nedra.
3. Demakhin S. A., Demakhin A. G. 2003. Selektivnye metody izolyatsii vodopritoka v neftyanye skvazhiny [Selective Water Shutoff Techniques in Oil Wells]. Saratov: Kolledzh.
4. Deng L., King M. J. 2015. "Capillary Corrections to Buckley-Leverett Flow". Paper Presented at the SPE Conference.
5. Johansen T. E., James L. A., Xiaolong L. 2016. "On the Buckley-Leverett Equation with Constant-Pressure Boundary Conditions". SPE Journal Paper.
6. Leontyev N. E. 2006. "O strukture fronta poristosti pri dvizhenii suspenzii v poristoy srede" [On the Structure of the Front Suspension When Driving Porosity in a Porous Medium]. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika, no 5.
7. Maksimov M. M., Rybitskaya L. P. 1976. Matematicheskoe modelirovanie protsessov razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Mathematical Modeling of Oil Field Development]. Moscow: Nedra.
8. Sethian J. A., Chorin A. J., Concus P. 1983. "Numerical Solution of the Buckley-Leverett Equations". Paper Presented at the SPE Conference.
9. Wu Y.-S., Pruess K., Chen Z. X. 1993. "Buckley-Leverett Flow in Composite Porous Media". SPE Advanced Technology Series, vol. 1, no 2.
10. Zakharov V. P., Ismagilov T. A., Telin A. G., Silin M. A. 2010. Neftepromyslovaya khimiya regulirovanie filtratsionnykh potokov vodoizoliruyushchimi tekhnologiyami pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy [Oilfield Chemistry Regulating Filtration Flows Water Shutoff Technology in the Development of Oil Fields]. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas.