

УДК 622.276.43

**Е.В. Чепкасова**<sup>1,3</sup>, e-mail: E.V.Chepkasova@gmail.com; **М.Г. Иванов**<sup>2,3</sup>, e-mail: Ivanov.mg@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

<sup>1</sup> Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных месторождений РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина (Москва, Россия).

<sup>2</sup> Кафедра разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина (Москва, Россия).

<sup>3</sup> ООО «Газпром добыча Ноябрьск» (Ноябрьск, Россия).

## Оценка технологической эффективности применения воды в качестве агента вытеснения в условиях низкопроницаемого коллектора

Изменения в структуре запасов нашей страны и существенное увеличение запасов, приуроченных к низкопроницаемому коллектору, приводит к росту значимости трудноизвлекаемых запасов, с вовлечением в разработку которых связано будущее России. В работе рассматриваются теоретические и практические вопросы, связанные с рациональной и эффективной выработкой запасов нефти, сосредоточенных в низкопроницаемых коллекторах. Проведен анализ проблем, возникающих при разработке подобных коллекторов методом заводнения. Поскольку проектные решения по разработке месторождений углеводородов формируются на основании расчетных технологических показателей разработки, полученных в ходе гидродинамических расчетов, то учет качества закачиваемой в пласт воды является критическим параметром при разработке низкопроницаемых коллекторов. Стандартный подход моделирования процесса вытеснения нефти водой, заложенный в программные комплексы, предполагает идеальную степень очистки воды, что не встречается на практике. В статье разработана методика, которая позволяет оценить влияние качества закачиваемой воды (в зависимости от содержания и размеров твердых взвешенных частиц) на технологические показатели разработки низкопроницаемых коллекторов при проведении прогнозных гидродинамических расчетов. Методика позволяет выделить области пласта, охваченные процессом вытеснения нефти водой, в зависимости от характера распределения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пласта и качества подготовки рабочего агента. Данный подход позволяет приблизить основные технологические показатели разработки, полученные посредством гидродинамических расчетов, к реальным условиям. Гидродинамический расчет с использованием разработанной методики показал, что неучет качества закачиваемой воды в условиях низкопроницаемого коллектора приводит к завышению КИН почти на 50%.

**Ключевые слова:** трудноизвлекаемые запасы, низкопроницаемый коллектор, качество закачиваемой воды в системе ППД.

.....

**Е.В. Чепкасова**<sup>1,3</sup>, e-mail: E.V.Chepkasova@gmail.com; **М.Г. Иванов**<sup>2,3</sup>, e-mail: Ivanov.mg@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

<sup>1</sup> Chair «Oil field development» of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russia).

<sup>2</sup> Chair «Gas field development» of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russia).

<sup>3</sup> Gazprom добыча Noyabrsk LLC (Noyabrsk, Russia).

## Technological efficiency evaluation applying water like as displacement agent in low permeable formation

Changes in structure reserves in our country and substantial increase in hard to recover reserves such as low-permeability reservoirs, leads to increase importance of such reserves, development of which is connected with future of Russia. The paper deals with the theoretical and practical issues related to the rational and effective oil production from low-permeability reservoirs. There is an analysis of problems encountered during oil development from such reservoirs by flooding. Accounting quality of injected water is a critical parameter in low-permeable reservoir development, as all design decision of hydrocarbon development are formed upon calculated main technological parameters hydrocarbon deposits development obtain from reservoir simulation. Ordinary approach included in software of water-oil displacement modeling account an ideal degree water purification, which does not occur in practice. In article present methodology for evaluating impact of injected water quality (depending on concentration and diameter of solids) on technological parameters of oil development from low-permeability reservoirs during forecast reservoir simulation was developed and tested. The technique allows emphasizing reservoir area covered water-oil displacement depending on reservoir properties distribution and degree preparation of injected water. The approach permits to approximate main technological parameters hydrocarbon development obtained by reservoir simulation to real condition. Example in using developed method during simulation showed that neglect water injected quality in low-permeable formation leads to overestimation oil recovery factor by almost on 50%.

**Keywords:** hard to recover reserves, low-permeable reservoir, injection water quality in flood pattern.

Таблица. Результаты оценки соответствия геолого-физических свойств исследуемых пластов критериям применимости метода заводнения  
Table. Assessment results of researched layers geological and physical properties compliance with criteria of water flooding method applicability

Параметр Parameter	Критерии применимости Applicability criteria	Пласт 1 Layer 1	Пласт 2 Layer 2	Пласт 3 Layer 3	Пласт 4 Layer 4
Глубина залегания пласта, м Formation depth, m	Незначительный параметр Insignificant parameter	-2150	-2200	-2250	-2300
Тип коллектора Reservoir type	Терригенный, карбонатный (поровый) Terrigenous, carbonate (pore)	Терригенный Terrigenous			
Глинистость, % Shaliness, %	< 5	10-12			
Толщина пласта, м Layer thickness, m	3-100	3,5	5,3	4,9	5,1
Пористость, % Porosity, %	10-40	14	14	13	14
Проницаемость, мкм <sup>2</sup> Permeability, μm <sup>2</sup>	0,1-5	0,0054	0,0043	0,0044	0,0034
Нефтенасыщенность, % Oil saturation, %	> 60	51	52	53	53
Пластовая температура, °С Formation temperature, °C	< 100	50	50	50	50
Вязкость пластовой нефти, мПа·с Formation oil viscosity, mPa s	< 30	0,5	0,5	0,5	0,5

Истощение запасов месторождений с маловязкой нефтью, нефтью, сосредоточенной в коллекторах относительно простого геологического строения, или, иными словами, запасов, относящихся к традиционным запасам нефти, приводит к ухудшению общей структуры запасов в нашей стране. Таким образом, остро возникает потребность в эффективном вовлечении в разработку трудноизвлекаемых запасов, сосредоточенных на территории Российской Федерации. К их группе принято относить запасы, сосредоточенные в коллекторах с проницаемостью менее 0,05 мкм<sup>2</sup> и формирующие группу низкопроницаемых коллекторов. По различным оценкам [2, 5], на их долю приходится от 28 до 40% промышленных запасов, что занимает максимальную долю в структуре трудноизвлекаемых запасов. В России наиболее распространенным методом воздействия на нефтяные пласты был и пока остается метод заводнения. Более 92% добычи нефти в нашей стране получено при реализации этого метода, в то время как в США эта доля составляет только около 40% от

общей добычи нефти. Эффективность извлечения нефти с применением заводнения во многом связана с соблюдением определенных требований как к геолого-физическим характеристикам объекта (критерии применимости), так и к технологическим решениям по его реализации. Отступление от этих правил приводит не только к низкому значению коэффициента извлечения нефти (КИН), но и к формированию нового класса трудноизвлекаемых запасов – остаточных запасов нефти, выработка которых либо будет невозможна, либо потребует значительного увеличения затрат. Эффективность системы заводнения в условиях низкопроницаемого коллектора была основана на анализе ряда месторождений Западной Сибири, для которых расчетные показатели КИН оказались в 2–3 раза выше, чем фактически достижимые. Одной из вероятных причин значительного расхождения расчетных и фактических показателей разработки являются ограниченные возможности гидродинамических симуляторов, которые по умолчанию не

учитывают качество подготовки закачиваемой в пласт воды. В ходе исследования было рассмотрено влияние качества закачиваемой воды на технологические показатели разработки в условиях низкопроницаемого коллектора. В основу легла аналитическая методика, определяющая максимальные размеры твердых взвешенных частиц (ТВЧ) и их концентрацию для коллекторов с различной фильтрационной характеристикой пластов [2]. Полученная в ходе исследования методика позволяет учитывать влияние качества закачиваемой в пласт воды на величину коэффициента охвата пласта заводнением путем задания ограничений на характер относительной фазовой проницаемости (ОФП) для воды в ячейках с критическими значениями проницаемости.

### ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

Объектом вычислительных экспериментов являлись низкопроницаемые залежи легкой нефти терригенных

Ссылка для цитирования (for references):

Чепкасова Е.В., Иванов М.Г. Оценка технологической эффективности применения воды в качестве агента вытеснения в условиях низкопроницаемого коллектора // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. No 2. С. 82–86.

Chepkasova E.V., Ivanov M.G. Technological efficiency evaluation applying water like as displacement agent in low permeable formation (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2016, No. 2. P. 82–86.

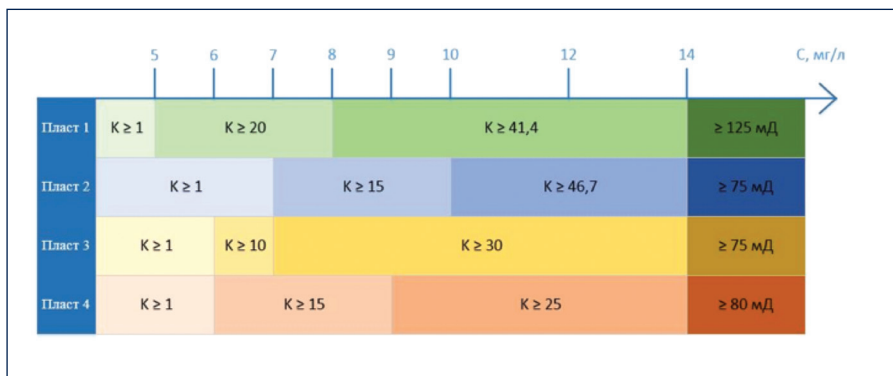


Рис. 1. Определение работающей части коллектора по проницаемости от концентрации ТВЧ в закачиваемой воде: С – концентрация ТВЧ, мг/л; К – проницаемость коллектора, мД  
 Fig. 1. Determination of reservoir working part by permeability depending on suspended solids (SS) concentration in injected water: С – SS concentration, mg/l; К – reservoir permeability, мД

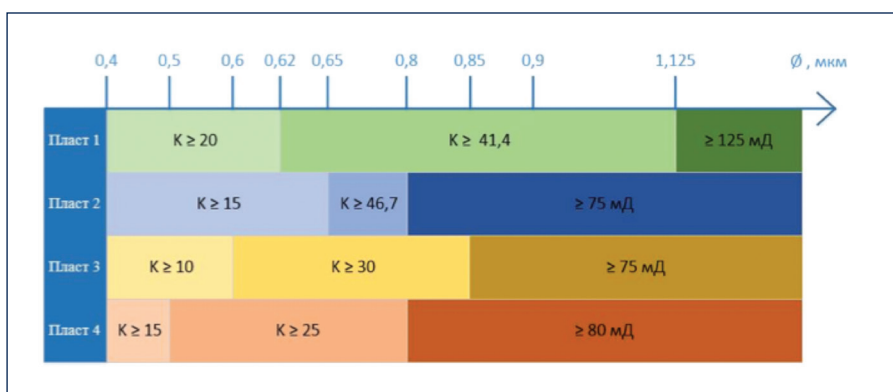


Рис. 2. Определение работающей части коллектора по проницаемости от размеров ТВЧ в закачиваемой воде: Ø – диаметр ТВЧ, мкм; К – проницаемость коллектора, мД  
 Fig. 2. Determination of reservoir working part by permeability depending on suspended solids (SS) size in injected water: Ø – SS diameter, µm; К – reservoir permeability, мД

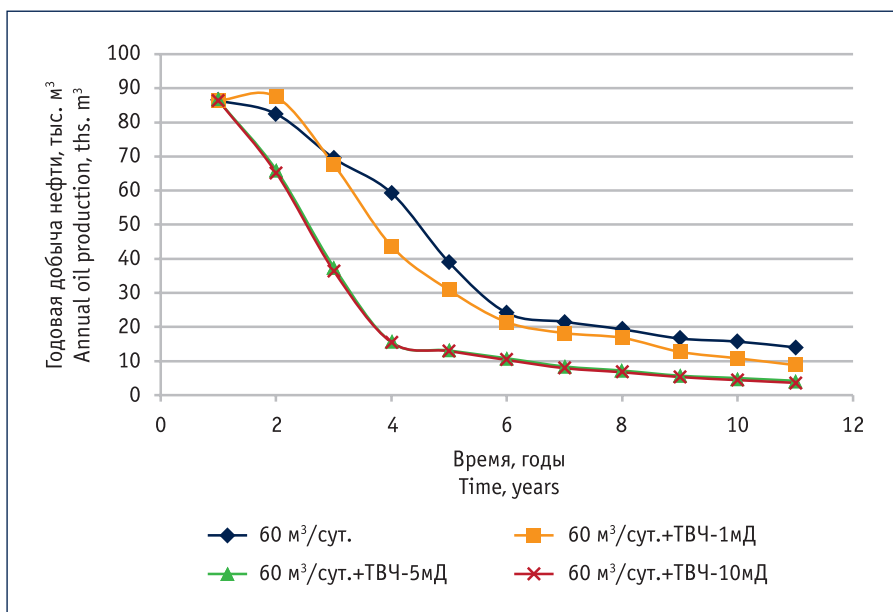


Рис. 3. Годовая добыча нефти с учетом и без учета качества закачиваемой в пласт воды, тыс. м³  
 Fig. 3. Annual oil production taking into account and discounting quality of water injected into layer, ths. m³

отложений тюменской свиты, которые повсеместно распространены в центральной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции и запасы которых отнесены к категории трудноизвлекаемых. Привлекательностью развития разработки углеводородов, сосредоточенных в месторождениях подобного строения, является развитая инфраструктура региона, что позволяет сократить затраты на обустройство месторождения.

Пласты имеют сложное геологическое строение, которое выражено чередованием прослоев и линз песчаников, алевритов и аргиллитов; характеризуются невыдержанностью нефтенасыщенной толщины по разрезу, нулевой вертикальной проницаемостью между чередующимися песчаными линзами и низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

### ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КАЧЕСТВУ ЗАКАЧИВАЕМОЙ ВОДЫ

Существенную роль в эффективности применения системы поддержания пластового давления (ППД) играет качество воды. Закачиваемая вода не должна снижать проницаемость породы и вызывать коррозию оборудования. Закачка воды продолжается длительный период, небольшие примеси в закачиваемой воде постепенно засоряют околоскважинную зону пласта (ОЗП) и снижают приемистость скважин, а применение различных технологий по ее очистке не всегда дает положительный эффект. Механические примеси в основном имеют размеры до 15 мкм, но могут достигать и 25 мкм. Частицы сульфида железа, содержащиеся в механических примесях, имеют размеры от 5 до 10 мкм и могут создавать агломераты размерами до 50 мкм. Содержание капелек нефти в закачиваемой воде может изменяться от 30 до 150 мг/л. Размеры капель нефти и механических примесей имеют размеры, соизмеримые с размерами поровых каналов [6].

В глинистом коллекторе снижение минерализации пластовой воды при закачке пресной воды может приводить к набуханию глин и ухудшению ФЕС. Снижение минерализации воды с 40 до 10 г/л может снизить проницаемость

в 1,5–2 раза. Содержание глин в продуктивном коллекторе пластов юрских отложений может достигать 12%.

Поскольку ФЕС рассматриваемых пластов лежат вне диапазона границ применимости процесса заводнения (для удобства в таблице выделены параметры, не удовлетворяющие диапазону применимости заводнения), то такой параметр, как качество подготовки или очистки воды, является одним из определяющих для рассматриваемого процесса. По лабораторным исследованиям установлено, что коллектор с проницаемостью менее 0,001 мкм<sup>2</sup> нельзя рассматривать как объект разработки с системой ППД.

В ходе работы была сделана попытка оценить влияние качества закачиваемой воды на технологические показатели исследуемых залежей. Поскольку задача состояла в проведении расчетов технологических показателей разработки низкопроницаемого коллектора с использованием гидродинамического симулятора, где явным способом задать параметр, отвечающий за степень подготовки закачиваемой в пласт воды нельзя, то нами был проведен предварительный анализ, позволивший определить диапазон значений проницаемости пласта, в котором вода с заданной степенью очистки не участвовала в процессе вытеснения нефти. Далее при построении гидродинамической модели для полученных таким образом областей были заданы модифицированные ОФП воды.

Методика позволила установить соответствие между зонами пласта, которые будут охвачены процессом заводнения, и степенью очистки воды, выраженной в размере ТВЧ и их концентрации. По результатам проведенного анализа были установлены граничные значения работающих интервалов пластов по проницаемости в зависимости от содержания (мг/л) и размеров (мкм) ТВЧ в закачиваемой воде соответственно (рис. 1, 2). Так, при содержании в закачиваемой воде ТВЧ с концентрацией 5 мг/л и размером частиц не более 0,4 мкм в процессе вытеснения нефти водой будут участвовать гидродинамически связанные области с проницаемостью не менее 0,02 мкм<sup>2</sup> для пласта 1. Увеличение концентрации и размера

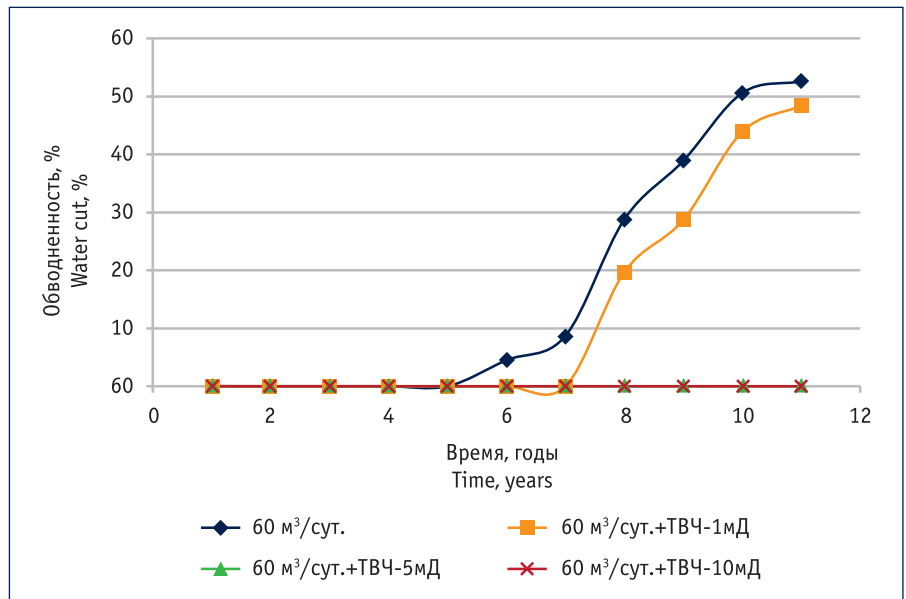


Рис. 4. Динамика обводненности по пласту с учетом и без учета качества закачиваемой в пласт воды, %

Fig. 4. Water cut schedule by a layer taking into account and discounting quality of water injected into layer, %

ТВЧ в воде приводит к увеличению и порогового значения проницаемости гидродинамически связанных пластов, участвующих в процессе вытеснения нефти водой.

Аналогичным образом по графикам были определены критические значения проницаемости для остальных пластов в зависимости от степени подготовки воды.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**

Прогнозные показатели разработки низкопроницаемых пластов с учетом степени очистки воды проводили с использованием гидродинамического симулятора PumaFlow (Beicip Franlab). Полученные на основании аналитической методики части пласта, охваченные процессом заводнения в зависи-

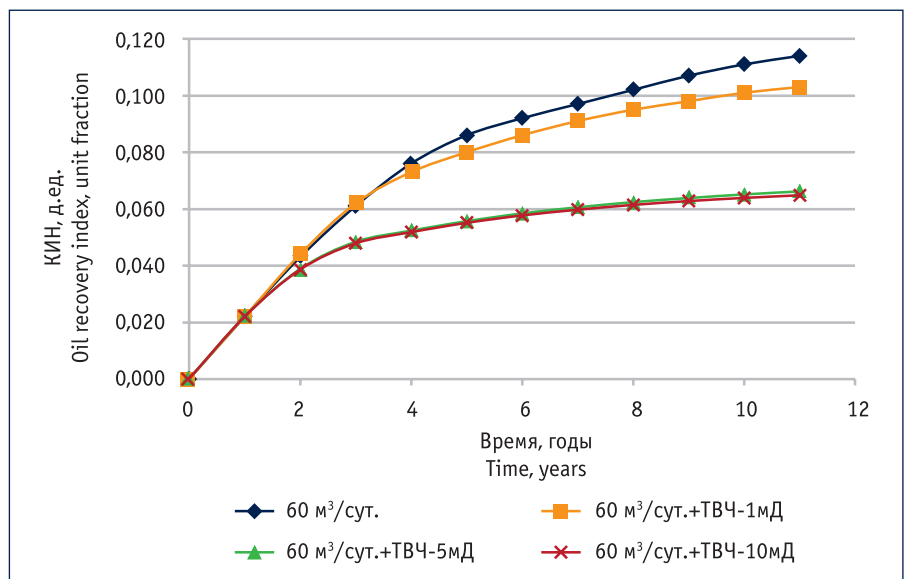


Рис. 5. КИН с учетом и без учета качества закачиваемой в пласт воды, д. ед.

Fig. 5. Oil recovery index taking into account and discounting quality of water injected into layer, unit fraction

мости от степени очистки воды, были выделены в области, где происходил процесс заводнения. Оставшаяся часть пласта разрабатывалась на естественном режиме.

На рисунках 3–5 представлены основные технологические показатели разработки низкопроницаемых пластов с учетом и без учета качества закачиваемой воды. В процессе расчетов было рассмотрено несколько степеней очистки воды: первая позволила охватить процессом заводнения ту часть пласта, проницаемость которой больше 0,010 мкм<sup>2</sup>, вторая – 0,005 мкм<sup>2</sup>, третья – 0,001 мкм<sup>2</sup>, четвертая – весь коллектор (идеальная степень очистки воды или без учета влияния качества закачиваемой воды). Неучет качества закачиваемой в пласт воды при разработке низкопроницаемых коллекторов приводит к улучшению технологических показателей разработки: завышена динамика годовой добычи нефти, завышен коэффициент охвата пласта воздействием, и, как следствие, завышено значение конечного КИН, а обводненность продукции растет более быстрыми темпами.

Таким образом, решения, принятые относительно подхода разработки низкопроницаемых коллекторов без учета качества закачиваемой воды и без учета изменения характера вытеснения нефти водой в этих условиях, приводят к недостижению утвержденного проектом разработки КИН, а также влекут за собой дополнительные затраты, связанные с усовершенствованием системы разработки, что в конечном итоге уменьшает экономическую эффективность проектов.

Методика, разработанная в ходе данного исследования, позволяет более детально описать влияние процесса заводнения на технологические показатели разработки низкопроницаемых коллекторов в зависимости от степени подготовки воды системы ППД и, как следствие, оценить экономическую эффективность заводнения в конкретных условиях. Стоит также подчеркнуть, что результаты, полученные с использованием предложенной методики, носят оптимистический характер, что связано в первую очередь со структурой порового пространства или гофрировкой пор, информация о которой

имеет точечный характер распределения и мало учитывается при построении геологических моделей.

### ВЫВОДЫ

В ходе исследования было показано, что для прогнозирования технологических показателей разработки низкопроницаемых коллекторов с применением заводнения необходимо учитывать качество закачиваемой воды.

Неучет качества закачиваемой воды приводит к завышению оценки КИН почти на 50%.

Предложенный авторами подход позволяет не только более объективно оценить КИН, но и спрогнозировать зоны низкопроницаемого пласта, которые не будут вовлечены в процесс вытеснения нефти.

Полученные результаты прогнозных показателей разработки месторождений даже с учетом качества закачиваемой воды носят оптимистический характер, поскольку гидродинамические модели представляют некую идеализацию реальной картины, не учитывающей эффект гофрировки пор.

### Литература:

1. Базив В.Ф. Экспертно-аналитическая оценка эффективности систем разработки нефтяных месторождений с заводнением. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2007. 396 с.
2. Гладков П.Д. Обоснование технологий физико-химического воздействия на низкопроницаемые полимиктовые коллектора (на примере южной лицензионной территории Приобского нефтяного месторождения): автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.17. СПб.: Национальный минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2012. 20 с.
3. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения проектирование, оптимизация и оценка эффективности: Учебное пособие. Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2005. 688 с.
4. Муслимов Р.Х. Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее: Учебное пособие. Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2012. 664 с.
5. Назарова Л.Н. Разработка нефтегазовых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами: Учеб. пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 156 с.
6. Тронов В.П., Тронов А.В. Очистка вод различных типов для использования в системе ППД. Казань: Фэн, 2001. 476 с.

### References:

1. Baziv V.F. *Ekspertno-analiticheskaja ocenka jeffektivnosti sistem razrabotki neftjanyh mestorozhdenij s zavodneniem* [Expert analytical estimation of water flooding oil field development system efficiency]. Moscow, All-Russian Research Institute for the Organization, Management and Economics of the Oil and Gas Industry, 2007. 396 pp.
2. Gladkov P.D. *Obosnovanie tehnologij fiziko-himicheskogo vozdejstvija na nizkopronicaemye polimiktovye kollektora (na primere juzhnoj licenzionnoj territorii Priobskogo neftjanogo mestorozhdenija)* [Substantiation of technology of physical and chemical impact on low permeability polymictic reservoir (in terms of the southern licensed territory of the Priobskoye field)]. Author's Abstract, Candidate of Science: 25.00.17. Saint-Petersburg, National Mineral Resources University (Mining University), 2012. 20 pp.
3. Muslimov R.Kh. *Sovremennye metody povyshenija nefteizvlechenija proektirovanie, optimizacija i ocenka jeffektivnosti* [Modern methods of oil recovery increase, designing, optimization and efficiency assessment]. Textbook. Kazan, Fen Publishing House under Tatarstan Academy of Sciences, 2005. 688 pp.
4. Muslimov R.Kh. *Nefteotdacha: proshloe, nastojashhee, budushhee* [Oil recovery: past, present and future]. Textbook. Kazan, Fen Publishing House under Tatarstan Academy of Sciences, 2012. 664 pp.
5. Nazrova L.N. *Razrabotka neftegazovyh mestorozhdenij s trudnoizvlekaemyimi zapasami* [Development of oil-gas fields with hard-to-recover reserves]. Textbook for Institutions of Higher Education. Moscow, Gubkin Russian State Oil and Gas University, 2011. 156 pp.
6. Tronov V.P., Tronov A.V. *Ochistka vod razlichnyh tipov dlja ispol'zovanija v sisteme PPD* [Purification of water of different types for use in FPM (formation pressure maintenance) system]. Kazan, Fen Publ., 2001. 476 pp.