

СИСТЕМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МЕТОДАМ ЗАКАЧКИ ВОДЫ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫЕ СКВАЖИНЫ

SYSTEMATIZATION OF METHODS OF WATER INJECTION IN WELLS

М. Я. Хабибуллин

Marat Ya. Khabibullin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Установка требуемых скоростей закачки воды для нагнетательных скважин является ключевым фактором для успешной эксплуатации нефтяного месторождения с помощью заводнения. Успех такой деятельности мог бы уменьшить цикличность воды на уровне поля, сечения и структуры; улучшить соотношение воды и нефти и эффективность очистки скважин; улучшить добычу и извлечение нефти путем направления воды в конкретные зоны и районы и сократить материальные затраты за счет улучшения использования воды. Как правило, инженеры на месте настраивают скорость закачки жидкости, используя эвристику. Хотя это улучшает производительность, мы считаем, что можно разработать более систематизированный подход. В соответствии с ограничениями, включающими в себя общее количество доступной воды, максимальную и минимальную скорость закачки, максимальную общую производственную жидкость для производителя и установку датчика, для определения оптимальной скорости закачки воды, на основе установленного фактора распределения, был применен оптимизатор линейного программирования.

Данный подход экспериментально протестирован на месторождении ОАО «Роснефть — Самаранефтегаз». Кривая спада добычи нефти рассчитана в течение 6 мес. Результаты трехмесячного экспериментального испытания показали, что оптимизированная добыча нефти хорошо соответствует исторической шестимесячной кривой снижения, примерно на 22 % меньше общей суточной подачи воды, также мы наблюдали прирост на 2 % выше исторической двухмесячной кривой снижения (также на 22 % меньше общей дневной закачки воды). Данные результаты показывают, что систематизированный метод может обеспечить оптимизацию целевых скоростей закачки воды.

Setting the required injection water rates for injection wells is a key factor for oil field successful operation using waterflooding. The success of such activities could reduce the water cyclical nature at field level, cross-section and structure; improve the ratio of water and oil and the wells cleaning efficiency; improve production and recovery of oil by channeling water to specific zones and areas and reduce material costs by improving water use. As a rule, on-site engineers adjust the fluid injection rate using heuristics. While this improves performance, we believe that a more systematic approach can be developed. In accordance with the limitations, including the available water total amount, the maximum and minimum injection rate, the maximum total production liquid for the manufacturer and the sensor installation, to determine the optimal water injection rate, based on the established distribution factor, the linear optimizer was applied programming.

Ключевые слова

оптимизация; скорость;
нагнетательная скважина;
жидкость; вязкость

Key words

optimization; rate; injection;
well; fluid; viscosity

This approach has been experimentally tested at the Rosneft Samaraneftgaz field. The decline curve of oil production is calculated within 6 months. The results of a three-month experimental test showed that optimized oil production fits well with the historical six-month decline curve, about 22 % less than the total daily water supply, we also observed a 2 % increase over the historical two-month decline curve (also by 22 % less total daily water injection). These results show that a systematic method can ensure the optimization of target water injection rates.

Установка требуемых скоростей закачки воды для нагнетательных скважин является ключевым фактором для успешной эксплуатации нефтяного месторождения с помощью заводнения. Успех такой деятельности мог бы: уменьшить цикличность воды на уровне поля, сечения и структуры; улучшить соотношение воды и нефти и эффективность очистки скважин; улучшить добычу и извлечение нефти путем направления воды в конкретные зоны и районы и сократить материальные затраты за счет улучшения использования воды. Как правило, инженеры на месте настраивают скорость закачки жидкости, используя эвристику. Хотя это улучшает производительность, мы считаем, что можно разработать более систематизированный подход, который приведет к дальнейшему росту.

В статье мы приводим систематизированный метод, используя линейное программирование, для оптимизации целевых скоростей закачки воды. Заводняемый резервуар считается системой, которая может быть смоделирована как совокупность импульсных ответов непрерывного времени, которые преобразуют скорости закачки воды в скорость движения пластовой жидкости [1, 2].

Для количественной оценки модели канала непрерывной импульсной реакции использовалась простая параметрическая модель — фильтр диффузии. Данный расширенный фильтр Кальмана был использован для определения коэффициентов распределения между инжекторами и производителями в воднозатопленное поле. В соответствии с ограничениями, включая общее количество доступной воды, максимальную и минимальную скорости закачки, максимальную общую производственную жидкость для производителя и установку датчика, для определения оптимальной скорости закачки воды, на основе установленного фактора распределения, был применен оптимизатор линейного программирования [3–5].

Этот метод был экспериментально протестирован на месторождении ОАО «Роснефть — Самаранефтегаз» в течение 3 мес. Кривая спада добычи нефти рассчитана в течение 6 мес. Результаты трехмесячного экспериментального испытания показали, что оптимизированная добыча нефти хорошо соответствует исторической шестимесячной кривой снижения, примерно на 22 % меньше общей суточной подачи воды, также мы наблюдали прирост на 2 % выше исторической двухмесячной кривой снижения (также на 22 % меньше общей дневной закачки воды). Данные результаты показывают, что систематизированный метод может обеспечить оптимизацию целевых скоростей закачки воды.

Заводнение на сегодняшний день является наиболее широко используемым методом вторичной регенерации в нефтяной промышленности. Как следует из названия, заводнение включает в себя впрыскивание воды в углеводородный пласт и движение пластовой жидкости в эксплуатационную скважину. В настоящее время заводнение отвечает за большую часть мировой добычи нефти, а успешное управление водными ресурсами чрезвычайно важно для мировой поставки нефти. Управление водными ресурсами — это широкая тема, включающая целый ряд видов деятельности, некоторые из которых выполняются только 1 или 2 раза в течение всего заводнения; другие выполняются периодически, на основе анализа повторяющихся данных измерений.

Установление целевых показателей закачки воды для нагнетательных скважин является одной из ключевых периодических работ.

Успех такой деятельности мог бы позволить достичь:

а) уменьшения цикличности воды на уровне поля, сечения и структуры;

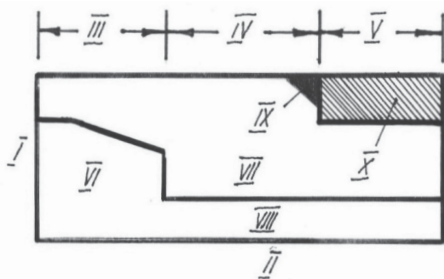
б) улучшения соотношения воды и нефти и эффективности охвата углеводородной залежи нефтеносного пласта;

в) повышения добычи и извлечения нефти путем направления воды в конкретные зоны и районы;

г) сокращения затрат на добычу нефти путем целевого использования воды [6, 7].

Как правило, добыча нефти на месторождении при заводнении ограничена комбинацией состояния источника водоснабжения, проточной сети трубопроводов и наземных сооружений. Регулирование скорости закачки воды может помочь контролировать добычу нефти [8]. Следовательно, как определить оптимальные целевые показатели впрыска воды при любых ограничениях на местах, чтобы максимизировать добычу нефти, важно для инженеров на месте. Однако из-за сложного динамического взаимодействия между источниками водоснабжения, нагнетательными скважинами, эксплуатационными скважинами и наземными объектами — это непростая задача. До сих пор были предложены некоторые подходы к оптимизации по регулированию скоростей закачки воды [9, 10]. Обычно назначают условия закачки в результате изучения практических данных: регулярно исследуются полученные практические данные по заводнению, затем принимается решение, куда вводить больше воды и куда — меньше. Эти подходы, хотя и полезны, оставляют место для дальнейшего совершенствования.

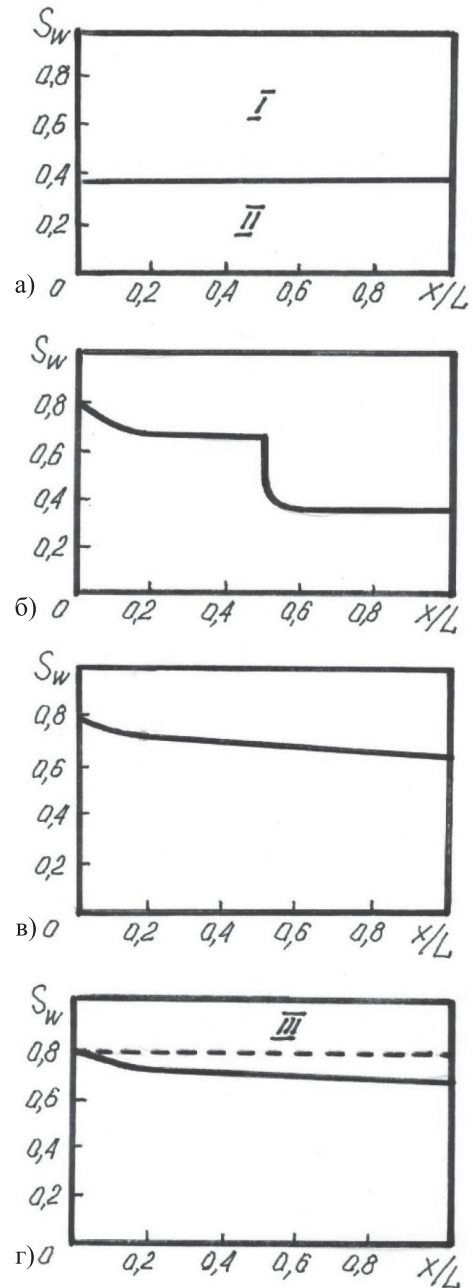
Вытеснение нефти водой из пористой и проницаемой породы является процессом нестационарного состояния, поскольку насыщение изменяется со временем и в зависимости от расстояния от точки закачки (рисунок 1).



I — насыщение; II — условная длина залежи; III — область водонасыщения; IV — область нефтенасыщения; V — незатронутая область; VI — вода; VII — нефть; VIII — водонефтяная смесь; IX — газовая ловушка; X — свободный газ

Рисунок 1. Профиль насыщенности в процессе заводнения

Изменения насыщения вызывают изменение относительных значений проницаемости и давлений в зависимости от времени в каждом положении в горном массиве. На рисунке 2 показаны различные этапы процесса перемещения нефти/воды в однородной линейной системе.



L — условная длина углеводородной залежи, м; X — длина направления, м; x/L — безразмерна и изменяется от 0 до 1; I — нефть; II — пластовая вода; III — остаточная нефть
а) первоначальное состояние;
б) начальная стадия закачки воды;
в) последующая стадия закачки воды;
г) конечная стадия закачки воды

Рисунок 2. Распределение насыщенности S_w на разных этапах заводнения

Математический вывод уравнений движения жидкости для пористых сред начинается с простого метода расчета баланса материала. Эти уравнения написаны для всей системы и для каждой из фаз: вода, нефть и газ. В результате получаем уравнения для сохранения массы для однородной линейной системы вода/нефть [11]:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho_o u_{ox}) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho_o S_o \varphi), \quad (1)$$

а также

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho_w u_{wx}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w S_w \varphi), \quad (2)$$

где x — положение в x -координатной системе, м;

ρ_o — плотность нефти, кг/м³;

u_{ox} — скорость нефти в направлении x , м/с;

t — время, с;

S_o — нефтенасыщенность, %;

φ — пористость, %;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

u_{wx} — скорость воды в направлении x ;

S_w — водонасыщенность, %.

Предполагая, что нефть и вода несжимаемы и что пористость постоянна, эти уравнения становятся:

$$-\frac{\partial q_o}{\partial x} = A\varphi \frac{\partial S_o}{\partial t}, \quad (3)$$

а также

$$-\frac{\partial q_w}{\partial x} = A\varphi \frac{\partial S_w}{\partial t}, \quad (4)$$

где q_o — объем добычи нефти, м³;

A — площадь поперечного сечения, доступная для потока, м²;

q_w — объем закачиваемой воды, м³.

Далее в эти уравнения включены уравнения для дробного течения нефти и воды. Три уравнения дробного потока:

$$f_o = \frac{q_o}{q_t} = \frac{q_o}{q_w + q_o}, \quad (5)$$

$$f_w = \frac{q_w}{q_t} = \frac{q_w}{q_w + q_o}, \quad (6)$$

$$f_o + f_w = 1, \quad (7)$$

где f_o — дробный поток нефти;

q_t — общая производительность, м³/с;

f_w — дробный поток воды.

Подставляя выражение (6) в уравнение (4), получим:

$$-\frac{\partial f_w}{\partial x} = \frac{\varphi A}{q_t} \frac{\partial S_w}{\partial t}. \quad (8)$$

Дальнейшая математическая манипуляция этими уравнениями дает уравнение Бакли-Леверетта или уравнение фронтального

продвижения. Для получения этого уравнения предполагается, что дробный поток воды является функцией только водонасыщенности, а массовый перенос между нефтяной и водной фазами отсутствует:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) S_w = \frac{q_t}{\varphi A} \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w}\right) t. \quad (9)$$

Данное уравнение показывает, что при линейном смещении воды, вытесняющем нефть, каждая водонасыщенность движется через породу со скоростью, которая рассчитывается из производной дробного потока по отношению к водонасыщенности. Тогда общая форма уравнения дробного потока для воды будет иметь вид:

$$f_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{k_o}{k_w}\right)\left(\frac{\mu_w}{\mu_o}\right)} + \frac{\frac{k_o A}{\mu_o q_t} \left[\frac{\partial P_c}{\partial x} + (\rho_o - \rho_w) g \sin \alpha \right]}{1 + \left(\frac{k_o}{k_w}\right)\left(\frac{\mu_w}{\mu_o}\right)}, \quad (10)$$

где k_o — проницаемость для нефти, мД;

μ_w — вязкость воды, Па·с;

μ_o — вязкость нефти, Па·с;

P_c — градиент давления в порах, Па;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

α — угол падения пор, град.;

k_w — проницаемость для воды, мД.

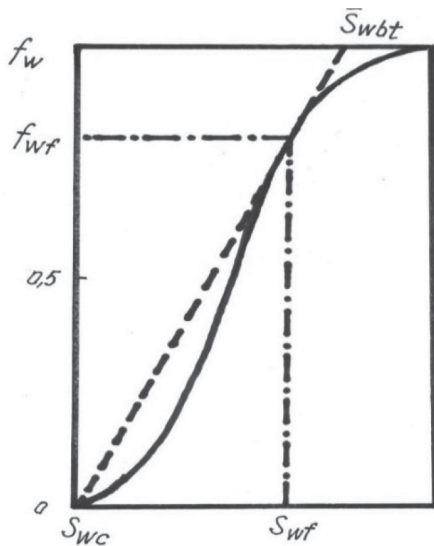
Это уравнение включает в себя условия для изменения капиллярного давления (как функции насыщения) в линейном направлении и для линейной системы, возможно, погружающейся под углом α [12].

Предполагая, что градиент давления P_c очень мал, а линейная система имеет горизонтальное расположение, уравнение (10) можно преобразовать:

$$f_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{k_o}{k_w}\right)\left(\frac{\mu_w}{\mu_o}\right)}. \quad (11)$$

На рисунке 3 представлена типичная кривая дробного потока, которая была рассчитана по формуле (11). На рисунке 3 также показана касательная к кривой дробного потока, которая возникает при начальной насыщенности водой.

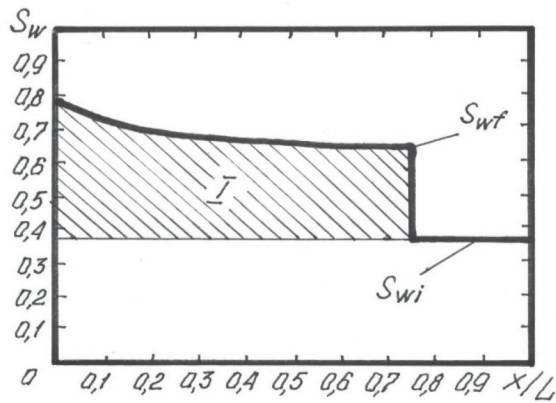
Касательная точка определяет водонасыщение S_{wf} при «прорыве» или «на фронте наводнения». Это водонасыщение эквивалентно тому, которое Бакли и Леверетт получили с помощью интуитивных аргументов [13]. Впоследствии было признано, что эта касательная пересекает кривую дробного потока при водонасыщении нефтеносных пор, которая является общей для стабилизированных и нестабилизированных зон.



f_{wf} — дробный поток воды на фронте наводнения; \bar{S}_{wbt} — средняя водонасыщенность за фронтом наводнения при прорыве воды; S_{wf} — водонасыщенность на фронте наводнения

Рисунок 3. Определение водонасыщенности при наводнении

Уравнение фронтального продвижения (9) не может предсказать профиль насыщения между насыщенностью воды и насыщенностью прорыва. Аппроксимация, полученная из решения Бакли-Левретта, рассматривает изменение насыщения как ступенчатое увеличение от насыщения S_{wc} до насыщения S_{wf} . На рисунке 4 показан этот профиль насыщения.



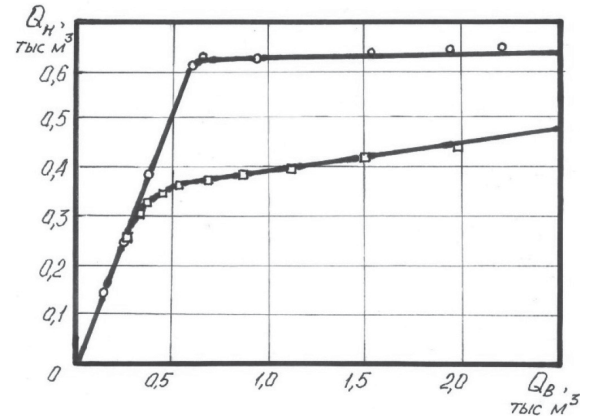
I — смещенная область нефти

Рисунок 4. Профиль насыщения, вычисленный из решения Бакли-Левретта

Ступенчатое возрастание насыщения возникает, потому что все насыщения, которые меньше S_{wf} , движутся со скоростью фронта заводнения. Насыщения больше S_{wf} движутся со скоростями, которые определяются из уравнения (9) путем вычисления производной кривой дробного потока при каждом значении S_w . Полученные результаты (рисунок 4)

подтверждают экспериментально, с учетом упрощенной аппроксимации, решение уравнения Бакли-Левретта.

На рисунке 5 сравниваются экспериментальные результаты с вычисленными значениями для двух видов нефтей, которые имеют почти стократную разницу в вязкости.



Q_n — добыча нефти; Q_v — закачка воды
Зависимости показывают расчетную производительность заводнения: \circ — экспериментально наблюдаемое смещение воды с нефтью при вязкости последней 151,0 сП; \square — экспериментально наблюдаемое смещение воды с нефтью при вязкости последней 1,8 сП

Рисунок 5. Сравнение реакции заводнения с результатами, вычисленными из уравнения фронтального продвижения

С учетом полученных результатов, опуская значительные математические вычисления, на рисунке 6 показано влияние коэффициента вязкости на поведение дробного потока воды.

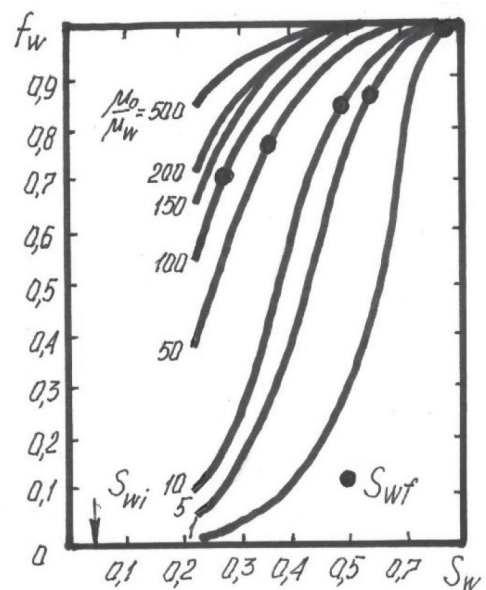


Рисунок 6. Влияние отношения вязкости на фракционный поток

Выводы

В результате получаем, что коэффициент вязкости является ключевым параметром.

Эффективности процессов линейного перемещения смешивающихся жидкостей (вода и пластовая нефть) существенно различаются:

когда вязкости нефти и воды одинаковы, то перемещение смешивающихся жидкостей происходит эффективнее по сравнению с тем, когда вязкость нефти намного выше, чем вязкость у воды.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шелепов В.В., Позднышев Г.Н., Стрижнев К.В., Румянцева Е.А. Способ повышения нефтеотдачи пластов методом заводнения // Интервал. 2005. № 4–5. С. 33–39.
2. Колганов В.И., Сургучев М.Л., Сазонов Б.Ф. Обводнение нефтяных скважин и пластов. М.: Недра, 1965. 262 с.
3. Хабибуллин М.Я., Петров В.А., Петрова Л.В., Хабибуллина Р.Г. Исследование процессов поглощения волн давления от закачиваемых жидкостей в структуре горной породы // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 3. С. 80–87.
4. Булгаков Р.Т., Газизов А.Ш., Габдуллин Р.Г. Ограничение притока пластовых вод в нефтяные скважины. М.: Недра, 1976. 174 с.
5. Блажевич В.А., Умрихина Е.Н., Уметбаев В.Г., Большаков И.А. Ограничение водоприток в скважинах при заводнении. М.: ВНИИОЭНГ, 1977. 56 с.
6. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И., Зайнагалина Л.З., Петров В.А. Варианты импульсного нестационарного заводнения в блоковых системах разработки // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 5. С. 99–103.
7. Асан-Заде А.Т. Результаты экспериментальных работ по изоляции водоприток в глубоких нефтяных скважинах // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 1984. № 6. С. 34–36.
8. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И., Филимонов О.В. Повышение эффективности разовых гидроимпульсных обработок призабойной зоны нагнетательных скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 6. С. 113–117.
9. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Maintenance System // Chem Petrol Eng. 2018. Vol. 54. No. 225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0467-2>.
10. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И., Сидоркин Д.И. Параметры гашения колебаний колонны насосно-компрессорных труб при работе забойных импульсных устройств // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 6. С. 19–22.
11. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.
12. Romo G.A., Leyva H.H. Advanced Technology to Reduce Water Cut // Case Studies From the Pemex Southern Region. Paper SPE 103638 presented at the First International Oil Conference and Exhibition held in Cancun, Mexico, 2006.
13. Buraffato G., Pitoni E. Water Control in Fissured Reservoirs // Diagnosis and Implementation of Solutions: Cases from North Italy. Paper SPE 96569 presented at

Offshore Europe 2005 held in Aberdeen. UK, Scotland, 2005.

REFERENCES

1. Shelepov V.V., Pozdnyshv G.N., Strizhnev K.V., Rumyantseva E.A. Sposob povysheniya nefteotdachi plastov metodom zavodneniya [Method of Enhanced Oil Recovery by Flooding]. *Interval — Interval*, 2005, No. 4–5, pp. 33–39. [in Russian].
2. Kolganov V.I., Surguchev M.L., Sazonov B.F. *Obvodnenie neftyanykh skvazhin i plastov* [Watering of Oil Wells and Reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 262 p. [in Russian].
3. Khabibullin M.Ya., Petrov V.A., Petrova L.V., Khabibullina R.G. Issledovanie protsessov pogloshcheniya voln davleniya ot zakachivaemykh zhidkosti v strukture gornoi porody [Study of the Processes of Absorption of Pressure Waves from Injected Fluids in the Structure of Rock]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Oil and Gas Studies*, 2018, No. 3, pp. 80–87. [in Russian].
4. Bulgakov R.T., Gazizov A.Sh., Gabdullin R.G. *Ogranichenie pritoka plastovykh vod v neftyanye skvazhiny* [Restriction of Formation Water Inflow into Oil Wells]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 174 p. [in Russian].
5. Blazhevich V.A., Umrikhina E.H., Umetbaev V.G., Bol'shakov I.A. *Ogranichenie vodopritokov v skvazhinakh pri zavodnenii* [Restriction of Water Production in Wells with Water Flooding]. Moscow, VNIIOENG, 1977. 56 p. [in Russian].
6. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I., Zainagalina L.Z., Petrov V.A. Varianty impul'snogo nestatsionarnogo zavodneniya v blokovykh sistemakh razrabotki [Variants of Pulse Non-Stationary Waterflooding in Block Development Systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Oil and Gas Studies*, 2017. No. 5, pp. 99–103. [in Russian].
7. Asan-Zade A.T. Rezul'taty eksperimental'nykh rabot po izolyatsii vodopritokov v glubokikh neftyanykh skvazhinakh [The Results of Experimental Work on the Isolation of Water Inflows in Deep Oil Wells]. *Azerbaidzhanskoe neftyanoie khozyaistvo — Azerbaijan Oil Industry*, 1984, No. 6, pp. 34–36. [in Russian].
8. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I., Filimov O.V. Povyshenie effektivnosti razovykh gidroimpul'snykh obrabotok prizaboynoi zony nagnetatel'nykh skvazhin [Improving the Efficiency of One-Time Hydro-Pulse Treatments of the Bottomhole Zone of Injection Wells]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Oil and Gas Studies*, 2017, No. 6, pp. 113–117. [in Russian].
9. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Maintenance System. *Chem. Petrol Eng*, 2018, Vol. 54, No. 225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0467-2>.

10. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I., Sidorkin D.I. Parametry gasheniya kolebaniy kolonny nasosno-kompressornykh trub pri rabote zaboinykh impul'snykh ustroystv [The Damping Parameters of the Tubing String when Operating a Downhole Pulse Device]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie*, 2017, No. 6, pp. 19–22. [in Russian].

11. Korn G.A., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 832 p. [in Russian].

12. Romo G.A., Leyva H.H. Advanced Technology to Reduce Water Cut. Case Studies from the Pemex Southern Region. *Paper SPE 103638 presented at the First International Oil Conference and Exhibition held in Cancun, Mexico*, 2006.

13. Buraffato G., Pitoni E. Water Control in Fissured Reservoirs. Diagnosis and Implementation of Solutions: Cases from North Italy. *Paper SPE 96569 presented at Offshore Europe 2005 held in Aberdeen, UK, Scotland*, 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ ABOUT THE AUTHOR

Хабибуллин Марат Яхиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», УГНТУ, филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация

Marat Ya Khabibullin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oilfield Machines and Equipment Department, USPTU, Branch, Oktyabrskiy, Russian Federation

e-mail: m-hab@mail.ru