

Моделирование показателей эксплуатации скважин со сложной геометрией трещин гидравлического разрыва пласта

Андреев Е.Ю., Волков М.Г., Исламов Р.А., Макеев Г.А., Сотниченко И.В.

ООО «РН-БашНИПнефть», Уфа, Россия
islamovra@bnipi.rosneft.ru

Аннотация

Разработка трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) с проницаемостью коллектора менее 0,5 мД ставит перед специалистами вызовы по повышению рентабельности добычи нефти. Основным направлением решения этой задачи является повышение продуктивности за счет бурения скважин с горизонтальным окончанием с длиной хвостовика более 1 000 м и проведение многостадийного гидравлического разрыва пласта (МГРП). Проектирование и внедрение перспективных дизайнов трещин гидравлического разрыва пласта (ГРП) требует новых подходов по оценке их прогнозной продуктивности. Существующие аналитические и численные методики расчета прогнозной продуктивности используют средние параметры трещин. На практике дизайны часто характеризуются сложной геометрией и неравномерным распределением проводимости в объеме трещины ГРП. Использование некорректных алгоритмов определения средних параметров трещин приводит к значительному отклонению динамики фактического дебита скважины от рассчитанной. Это приводит к использованию неоптимальных дизайнов при проведении ГРП и снижению рентабельности добычи из объектов ТРИЗ. Для повышения качества оценки эффективности дизайна ГРП разработана методика интеграции симулятора гидравлического разрыва пласта и гидродинамического симулятора, которая позволяет выполнить корректный расчет продуктивности скважины.

Материалы и методы

Для решения задачи в работе предлагается:

- проектирование перспективных дизайнов в симуляторе ГРП;
- импорт спроектированных дизайнов в гидродинамический симулятор;
- расчет продуктивности скважины с проектными дизайнами ГРП в гидродинамическом симуляторе;

- выбор эффективного дизайна для опытных испытаний и внедрения.

Ключевые слова

трудноизвлекаемые запасы, гидродинамическое моделирование, гидравлический разрыв пласта, гидродинамический симулятор, симулятор ГРП

Для цитирования

Андреев Е.Ю., Волков М.Г., Исламов Р.А., Макеев Г.А., Сотниченко И.В. Моделирование показателей эксплуатации скважин со сложной геометрией трещин гидравлического разрыва пласта // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 2. С. 51–54. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-51-54

Поступила в редакцию: 17.03.2023

OIL PRODUCTION

UDC 622.276.3 | Original Paper

Performance of fractured wells with complex geometry hydraulic fractures modeling

Andreev E.Yu., Volkov M.G., Islamov R.A., Makeev G.A., Sotnichenko I.V.

“RN-BashNIPneft” LLC, Ufa, Russia
islamovra@bnipi.rosneft.ru

Abstract

The development of hard-to-recover reserves with reservoir permeability less than 0,5 mD poses challenges for specialists to increase the profitability of oil production. The main direction of solving this problem is to increase productivity by drilling horizontal wells with a liner length of more than 1 000 m and performing multi-stage hydraulic fracturing. The design and implementation of promising designs of hydraulic fracturing fractures requires new approaches to assess their predictive productivity. Existing analytical and numerical methods for calculating predicted productivity use average fracture parameters. In practice, designs are often characterized by complex geometry and uneven distribution of conductivity in the volume of the hydraulic fracture. The use of incorrect algorithms for determining the average parameters of fractures leads to a significant deviation of the dynamics of the actual well flow rate from the calculated one. This leads to the use of non-optimal designs during hydraulic fracturing and a decrease in the profitability of extraction from hard-to-recover resources. To improve the quality of evaluation of hydraulic fracturing design efficiency, a technique for integrating a hydraulic fracturing simulator and a hydrodynamic simulator has been developed, which allows performing a correct calculation of well productivity.

Materials and methods

To solve the problem, the work proposes:

- designing perspective designs in hydraulic fracturing simulator;
- import of designed designs into hydrodynamic simulator;
- calculation of well productivity with designed hydraulic fractures in a hydrodynamic simulator;

- selection of an effective design for pilot testing and implementation.

Keywords

hard-to-recover reserves, hydrodynamic modeling, hydraulic fracturing, hydrodynamic simulator, hydraulic fracturing simulator

For citation

Andreev E.Yu., Volkov M.G., Islamov R.A., Makeev G.A., Sotnichenko I.V. Performance of fractured wells with complex geometry hydraulic fractures modeling. Exposition Oil Gas, 2023, issue 2, P. **–**. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-**-**

Received: 17.03.2023

Введение

На сегодняшний день как в России, так и в мире ежегодно увеличивается доля добычи нефти из объектов ТРИЗ [1]. В разработку вводятся запасы ачимовских пластов и их аналогов, а также запасы баженовской свиты со сверхнизкой проницаемостью (менее 0,5 мД) [2]. Такие объекты разрабатываются системами горизонтальных скважин с МГРП. Применение дизайнов ГРП на основе шитого геля не обеспечивает необходимую для рентабельной добычи нефти продуктивности скважин.

В настоящее время ведутся работы по созданию новых и оптимизации существующих дизайнов ГРП с учетом строения и распределения фильтрационно-емкостных свойств продуктивного пласта. Проектирование дизайнов ведется в корпоративном симуляторе гидроразрыва пласта «РН-ГРИД» [3]. Применяются гибридные технологии, характеризующиеся различной долей линейного геля в объеме жидкости разрыва, в сочетании с различной массой и концентрацией пропанта [4]. Актуальным становится вопрос оценки эффективности спроектированных дизайнов ГРП и выбор нескольких дизайнов с максимальной продуктивностью перед проведением опытно-промышленных испытаний на объектах разработки. С этой целью из симулятора выгружаются параметры трещины ГРП: полудлина x_f , средняя ширина w_f , высота h_f , проницаемость k_f . В качестве полудлины и высоты трещины ГРП на практике берутся максимальные значения из дизайна ГРП. Обязательно выполняется проверка сохранения материального баланса: объем закрепленной трещины ГРП равен объему закачанного пропанта (1). Подгоночным параметром для соблюдения материального баланса обычно выбирают среднюю ширину трещины ГРП w_f .

$$2 \times x_f \times h_f \times w_f = \frac{M_p}{\rho_p}, \quad (1)$$

где M_p — масса пропанта; ρ_p — насыпная плотность пропанта.

Полученные параметры далее используются для оценки продуктивности скважин с ГРП, которая выполняется с применением аналитических формул, корреляционных зависимостей и гидродинамического моделирования.

Целью работы является создание методики корректного расчета продуктивности горизонтальных скважин с МГРП со сложной геометрией и неоднородным распределением свойств в объеме трещины с использованием гидродинамического симулятора.

Варианты моделирования трещин ГРП в гидродинамическом симуляторе

В работе для оценки продуктивности горизонтальных скважин с МГРП использовано гидродинамическое моделирование с применением корпоративного гидродинамического симулятора ПК «РН-КИМ» [5]. В симуляторе реализованы следующие методы моделирования трещин ГРП (рис. 1) [6]:

- метод локального измельчения сетки;
- метод источников.

Метод локального измельчения является явным, так как используется для расчета уравнения фильтрации, такие как уравнение движения и закон сохранения. Плюсами применения метода измельчения являются точность расчета, учет нестационарного течения, влияние гравитации на фильтрацию

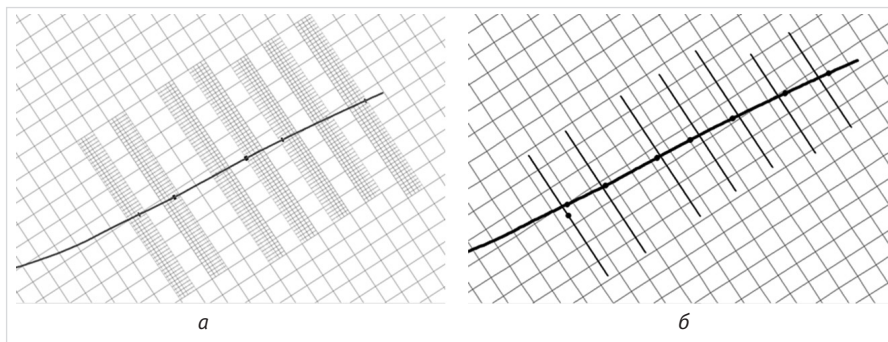


Рис. 1. Моделирование горизонтальной скважины с МГРП: а — методами измельчения, б — методом источников

Fig. 1. Simulation of a horizontal well with multi-stage hydraulic fracturing: a — grinding methods, б — source metho

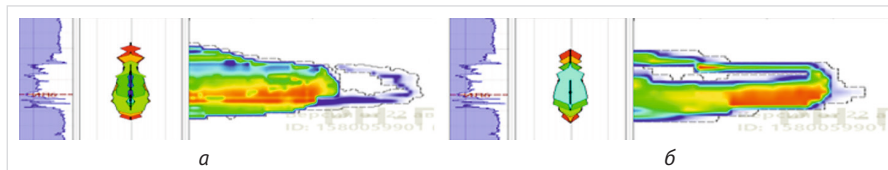


Рис. 2. Дизайны трещин ГРП (а — дизайн 1, б — дизайн 2), выбранные для испытания

Fig. 2. Hydraulic fracture designs (a — design 1, б — design 2), selected for testing

флюидов. К минусам относятся обязательная ориентация сетки модели вдоль направления развития трещины ГРП, сложность задания геометрии и свойств трещины в симуляторе, долгое время расчета, отсутствие возможности активации трещины во времени, то есть высокопроницаемая трещина присутствует в модели с начала расчета.

Метод источников для расчета притока к трещине ГРП использует математическую модель, описывающую стационарный приток. Плюсами применения метода источников являются простота и скорость задания трещины ГРП, произвольная ориентация трещины относительно расчетной сетки, высокая скорость расчета по сравнению с методом измельчения, возможность активации на любую дату. Минусами являются простая геометрия и равномерное распределение свойств в объеме трещины.

Рассмотрим задачу по выбору дизайна трещины ГРП методом гидродинамического моделирования на следующем примере. Продуктивный пласт в районе бурения куста скважин характеризуется проницаемостью менее 0,5 мД, толщиной 27 м. Сверху и снизу расположены водонасыщенные пласты, отделенные от целевого пласта тонкими глинистыми перемычками. Целью проектирования дизайна ГРП является создание длинной трещины, не выходящей по высоте за границы продуктивного пласта. Процедура проектирования дизайна состоит из следующих этапов:

1. на целевом участке выбираются опорная скважина с наличием специального комплекса геофизических исследований скважин (ГИС) (широкополосный акустический каротаж, плотностной каротаж) и со статическими геомеханическими исследованиями керна и скважина с проведенным ГРП;
2. в случае необходимости (потеря целостности, отсутствие данных, некачественные данные) восстанавливаются плотностной каротаж и интервалы времени пробега продольной и поперечной волн в целевом интервале;
3. по результатам керновых исследований рассчитываются статические модули,

необходимые для построения 1D геомеханической модели;

4. 1D геомеханическая модель калибруется на результаты мини-ГРП и ГРП;
5. проектируются дизайны ГРП, отвечающие заданным условиям: полудлина превышает заданное минимальное значение, трещина не выходит за границы продуктивного пласта.

По результатам проектирования было выбрано 2 дизайна трещины ГРП с близкими параметрами (рис. 2). Геометрические размеры трещин определены следующим образом: x_f и h_f взяты максимальными, w_f рассчитана по формуле (1). Эти значения были использованы для гидродинамических расчетов.

Для выполнения расчетов по оценке продуктивности построена секторная гидродинамическая модель, учитывающая фактическое строение и распределение фильтрационно-емкостных свойств продуктивного пласта в районе бурения куста. Физико-химические свойства пластовых флюидов и относительные фазовые проницаемости заданы по результатам лабораторных исследований глубинных проб нефти и образцов керна. Распределение фильтрационно-емкостных свойств в объеме пласта задано по результатам интерпретации ГИС в опорной скважине.

Для выбора дизайна трещины ГРП, обеспечивающей максимальную продуктивность, проведены гидродинамические расчеты. Для этого в модели вертикальной скважины с трещиной ГРП

Табл. 1. Параметры трещин ГРП, выбранных для испытания
Tab. 1. Parameters of hydraulic fractures selected for testing

Параметр	Дизайн 1	Дизайн 2
x_f , м	250	300
h_f , м	25	28
w_f , мм	5,6	5,1
Безразмерная проводимость трещины (Fcd)	5,8	5,6

указывались параметры, рассчитанные в дизайне (табл. 1). Трещина ГРП задавалась методом источников и методом измельчения. Контроль работы скважины осуществлялся по забойному давлению, период расчета — 12 месяцев. Различие в дебитах жидкости между методами измельчения и источников наблюдается только при неустановившемся режиме, на установившемся режиме — менее 5 %. Сравнение результатов расчетов показало, что дебит скважины на установившемся режиме для рассматриваемых дизайнов трещины ГРП отличается менее чем на 8 %. Сделать однозначный выбор между дизайнами трещин ГРП по результатам гидродинамических расчетов не удалось (рис. 3).

Расчет продуктивности скважины методом интеграции симулятора ГРП и гидродинамического симулятора

С целью решения задачи повышения точности прогнозирования продуктивности трещины ГРП было предложено перенести геометрию и свойства трещины ГРП из симулятора ГРП «РН-ГРИД» в гидродинамический симулятор ПК «РН-КИМ». Разработка обоих симуляторов ведется в корпоративном институте ООО «РН-БашНИПнефть», что позволяет быстро решить задачу интеграции данных. Методика интеграции включает следующие действия:

- реализовать выгрузку из «РН-ГРИД» параметров локального измельчения сетки, точки привязки к порту ГРП/интервалу инициализации, карты распространения свойств трещины ГРП;
- загрузить 2D-сетку и карты свойств трещины ГРП в гидродинамический симулятор;
- привязать трещину ГРП к одному или нескольким портам/интервалам инициации;
- в файле событий (schedule) активировать трещину на дату проведения ГРП;
- выполнить расчеты в гидродинамическом симуляторе ПК «РН-КИМ».

На рисунке 4 представлены результаты гидродинамических расчетов, выполненных методом измельчения и методом интеграции для спроектированных дизайнов ГРП. Анализ результатов расчетов позволяет сделать однозначный выбор дизайна ГРП. Продуктивность скважины для разных дизайнов трещины ГРП отличается на 30 % на установившемся режиме, что позволяет сделать однозначный выбор. Для проведения испытаний на опытно-участке был выбран дизайн 1.

Опытно-промышленные работы по испытанию эффективности предложенной технологии ГРП проведены на пласте с проницаемостью 0,3 мД. Была пробурена скважина с длиной горизонтального участка 1124 м, проведено 16 операций ГРП по дизайну 1 с ориентацией трещин поперек горизонтального ствола. Скважина была запущена в эксплуатацию в 2022 году и проработала более 9 месяцев.

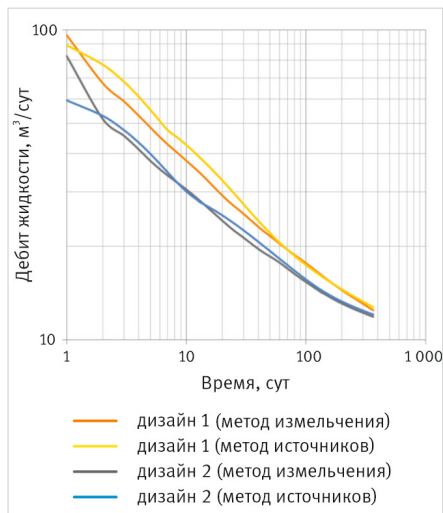


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов для двух дизайнов ГРП, выполненных методами измельчения и источников
Fig. 3. Comparison of calculation results for two hydraulic fracturing designs performed by grinding and source method

На данной скважине была опробована методика интеграции симулятора гидравлического разрыва пласта и гидродинамического симулятора. Был построен дизайн по фактическим данным проведенной операции ГРП. Карты свойств трещины были загружены в гидродинамическую модель и привязаны к портам ГРП (рис. 5). Выполнены гидродинамические расчеты с контролем работы скважины по фактическому дебиту жидкости. Сравнение фактических и рассчитанных показателей эксплуатации скважины показало хорошую сходимость (рис. 6). Это позволило сделать вывод об эффективности предложенного метода интеграции и возможности его применения в дальнейшем для расчета продуктивности трещин с неоднородной геометрией и распределением свойств в трещине ГРП. Для сравнения были выполнены расчеты для трещин ГРП по дизайну 2. Сравнение результатов расчетов для ГС с МГРП по дизайну 2 с фактическими показателями эксплуатации скважины (рис. 6) также подтвердили эффективность предложенного метода интеграции (табл. 2).

Итоги

Методика расчета продуктивности скважины с трещинами ГРП, основанная на задании прямоугольной геометрии со средними параметрами, может вносить большую погрешность для случаев трещин с неоднородным распределением свойств. Разработана методика переноса геометрии и свойств трещины ГРП из симулятора гидроразрыва пласта «РН-ГРИД» в гидродинамический симулятор ПК «РН-КИМ».

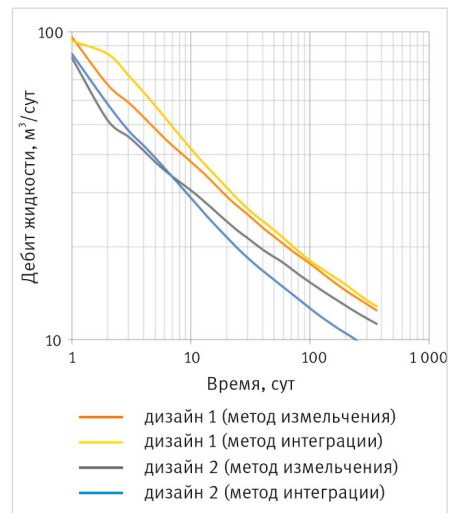


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов для двух дизайнов ГРП, выполненных методом измельчения и методом интеграции
Fig. 4. Comparison of calculation results for two hydraulic fracturing designs performed by the grinding method and the integration method

Данная методика опробована на объекте разработки со сложным строением и с проницаемостью менее 0,5 мД. Сравнение результатов гидродинамического моделирования для трещин ГРП с прямоугольной геометрией и средними параметрами не дало возможности выбрать эффективный дизайн. Применение методики интеграции показало, что продуктивность скважины с различными дизайнами ГРП значительно отличается, что позволило сделать однозначный выбор дизайна для проведения опытно-промышленных испытаний. Сравнение рассчитанной и фактической динамики показателей эксплуатации горизонтальной скважины с многостадийным ГРП по выбранному дизайну показало хорошую сходимость (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,97$).

Выводы

Разработана методика интеграции результатов расчетов гидродинамического симулятора и симулятора ГРП. Гидродинамические расчеты подтвердили эффективность методики. Сравнение показало, что продуктивность скважины, рассчитанная по методике, совпадает с фактической продуктивностью скважины. Методика интеграции будет использоваться для оценки продуктивности скважин с ГРП со сложной геометрией и неоднородным распределением свойств.

Литература

1. Шмелев П.И. ТРИЗ как объективная реальность. Особенности классификации

Табл. 2. Сравнение фактических и расчетных показателей работы скважины

Tab. 2. Comparison of actual and calculated well performance

Показатель	Факт	Дизайн 1	Дизайн 2
Накопленная добыча, м ³	26 865	26 865	21 080
Среднее забойное давление, атм	52	51	32
Достоверность аппроксимации забойного давления, доли ед.	1	0,97	0,64

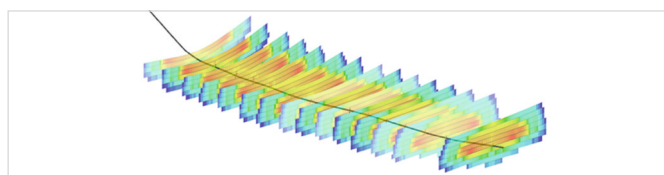


Рис. 5. Скважина с фактическими трещинами ГРП в гидродинамическом симуляторе ПК «РН-КИМ»
Fig. 5. A well with actual hydraulic fractures in the hydrodynamic simulator of the Software complex "RN-KIM"

и разработки трудноизвлекаемых запасов // Сибирская нефть. 2018. № 2. С. 17–23.

- Рязанцев М.В., Мироненко А.А., Кузин И.Г. и др. Приобское месторождение — 40 лет на благо родины! // Нефтяное хозяйство. 2022. № 6. С. 20–25.
- Ахтямов А.А., Макеев Г.А., Байдюков К.Н. и др. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта «РН-GRID»: от программной реализации к промышленному внедрению // Нефтяное хозяйство. 2018. № 5. С. 94–97.
- Мирошниченко А.В., Сергейчев А.В., Коротовских В.А. и др. Инновационные технологии разработки низкопроницаемых коллекторов в ПАО «НК «Роснефть» // Нефтяное хозяйство. 2022. № 12. С. 105–109.
- Бадюков И.Х., Байков В.А., Борщук О.С. Программный комплекс «РН-КИМ» как инструмент гидродинамического моделирования залежей углеводородов // Недропользование XXI век. 2015. № 4. С. 96–103.

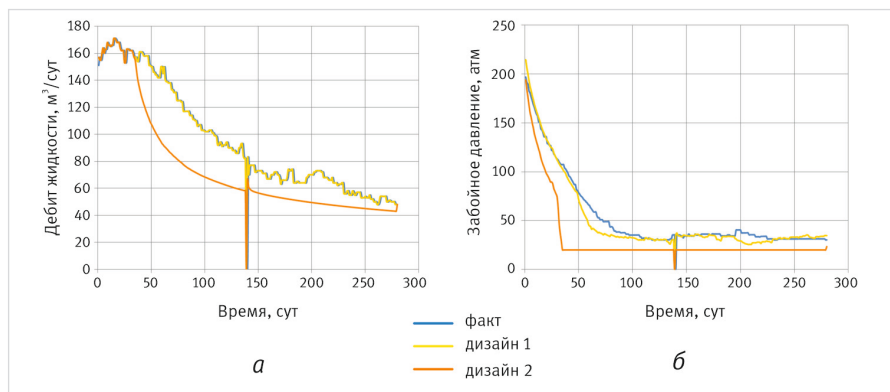


Рис. 6. Сравнение фактических и рассчитанных для рассматриваемых дизайнов ГРП показателей работы скважины (а — дебит жидкости, б — забойное давление)
Fig. 6. Comparison of actual and calculated well performance indicators for the considered hydraulic fracturing designs (a — fluid flow rate, б — bottomhole pressure)

- Андреев Е.Ю., Исламов Р.А., Дильмухаметов И.Р. Опыт моделирования скважин с гидроразрывом пласта в различных гидродинамических

симуляторах // Цифровые технологии в добыче и переработке углеводородов: от моделей к практике. М.: Нефтяное хозяйство, 2020. С. 60.

ENGLISH

Results

The technique for calculating the productivity of a well with hydraulic fractures, based on the assignment of a rectangular geometry with average parameters, can introduce a large error for cases of fractures with inhomogeneous distribution of properties. A technique has been developed for transferring the geometry and properties of a hydraulic fracture from the RN-GRID hydraulic fracturing simulator to the RN-KIM hydrodynamic simulator. This technique has been tested on a development site with a complex structure and with a permeability of less than 0,5 mD. Comparison of the results of hydrodynamic modeling for hydraulic fractures with rectangular geometry and average parameters did not make it possible to choose an effective design. The application of the integration technique showed that the productivity of the well with different hydraulic fracturing designs is significantly different, which made

it possible to make an unambiguous choice of design for pilot testing. Comparison of the calculated and actual dynamics of the performance of a horizontal well with multi-stage hydraulic fracturing according to the selected design showed good convergence (the approximation reliability value is $R^2 = 0,97$).

Conclusion

A technique for integrating the results of calculations of a hydrodynamic simulator and a hydraulic fracturing simulator has been developed. Hydrodynamic calculations confirmed the effectiveness of the technique. The comparison showed that the well productivity calculated by the method coincides with the actual well productivity. The integration technique will be used to evaluate the productivity of wells with hydraulic fracturing with complex geometry and heterogeneous distribution of properties.

References

- Shmelev P.I. HtRR as an objective reality. Features of classification and development of hard-to-recover reserves. Siberian oil, 2018, issue 2, P. 17–23. (In Russ).
- Ryazantsev M.V., Mironenko A.A., Kuzin I.G. Priobskoe oil field — 40 years for the motherland weal! Oil industry, 2022, issue 6, P. 20–25. (In Russ).
- Miroshnichenko A.V., Sergeichev A.V., Korotovskikh V.A. Innovative technologies for the low-permeability reservoirs development in Rosneft oil company. Oil industry, 2022, issue 12, P. 105–109. (In Russ).
- Akhtyamov A.V., Makeev G.A., Baydyukov K.N. Corporate fracturing simulator RN-GRID: from software development to in field implementation. Oil industry, 2018, issue 5, P. 94–97. (In Russ).
- Badykov I.K., Baykov V.A., Borschuk O.S. Software complex “RN-KIM” as a tool for hydrodynamic modeling of hydrocarbon reservoirs. Subsoil use XXI century, 2015, issue 4, P. 96–103. (In Russ).
- Andreev E.Y., Islamov R.A., Dilmuhametov I.R. Experience in modeling wells with hydraulic fracturing in various hydrodynamic simulators. Digital technologies in the production and processing of hydrocarbons: from models to practice. Moscow: Oil industry, 2020, P 60. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андреев Егор Юрьевич, главный специалист, ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

Andreev Egor Yurievich, chief specialist, “RN-BashNIPIneft” LLC, Ufa, Russia

Волков Максим Григорьевич, д.т.н., заместитель генерального директора, ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

Volkov Maxim Grigorievich, ph. d. of engineering sciences, deputy general director, “RN-BashNIPIneft” LLC, Ufa, Russia

Исламов Ринат Асхатович, старший эксперт, ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия
Для контактов: islamovra@bnipi.rosneft.ru

Islamov Rinat Askhatovich, senior expert, “RN-BashNIPIneft” LLC, Ufa, Russia
Corresponding author: islamovra@bnipi.rosneft.ru

Макеев Григорий Анатольевич, к.т.н., заместитель начальника управления, ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

Makeev Grigory Anatolievich, ph.d. of engineering sciences, deputy head of department, “RN-BashNIPIneft” LLC, Ufa, Russia

Сотниченко Игорь Валентинович, главный специалист, ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

Sotnichenko Igor Valentinovich, chief specialist, “RN-BashNIPIneft” LLC, Ufa, Russia