

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДОВ ПРИ ДОБЫЧЕ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ

SOME ASPECTS OF THERMAL METHODS APPLICATION IN SHALE OIL PRODUCTION

М. М. Абдуллин

Marat M. Abdullin

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

П. А. Федоров

Pavel A. Fedorov

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В. М. Абдуллин

Valery M. Abdullin

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

Истощение месторождений традиционной нефти способствует развитию добычи трудноизвлекаемого сырья. Таким сырьем является сланцевая нефть. Российская Федерация занимает третье место по мировым запасам сланцевой нефти. Однако высокая себестоимость, значительные экологические риски, малая производительность существующих способов добычи являются сдерживающим фактором для разработки этого вида сырья. Самыми распространёнными способами добычи нефти являются закачка газа, закачка химических реагентов на водной основе, тепловые и биологические способы. В статье приводятся рекомендации для выбора способа добычи сланцевой нефти с примерами обработки скважин исходя из опыта авторов. Описаны ранее предложенные способы добычи нефти с использованием термобарохимической обработки призабойной зоны скважины. Предложен способ добычи сланцевой нефти на основе применения пороховых зарядов, обеспечивающих беспламенное бездымное горение в случае наклонно-направленного бурения. Этот способ обеспечивает более длительное поддержание температуры, позволяющей раскрыть трещины пласта горючего сланца и сохранить при этом легкие фракции углеводородного сырья.

Depletion of conventional oil fields contributes to the development of hard-to-recover raw materials. This raw material is shale oil. The Russian Federation ranks third in the world's shale oil reserves. However, the high cost, significant environmental risks, low productivity of existing mining methods are a constraining factor for the development of this type of raw material. The most common oil production methods are gas injection, water based chemical injection, thermal and biological methods. The article provides recommendations for choosing a method for shale oil production with examples of well treatment based on the experience of the authors. previously proposed methods of oil production using thermobarochemical treatment of the bottomhole zone of the well are described. A method of shale oil production based on the use of powder charges providing flameless smokeless combustion in the case of directional drilling is proposed. This method provides for a longer maintenance of the temperature, which allows to open cracks in the oil shale formation and preserve light fractions of hydrocarbons.

В мире увеличиваются темпы роста потребления продукции на основе углеводородного сырья. Это, в свою очередь, приводит к истощению ранее изведанных месторождений с легко добываемой нефтью в таких странах,

как США, Россия, Казахстан, Норвегия. В результате нефтяные компании начинают осваивать месторождения с трудноизвлекаемым углеводородным сырьем. К такому сырью принято относить месторождения в горючих

Key words

сланцевая нефть; тепловые методы;
пороховые заряды;
беспламенное горение;
раскрытие трещин;
термобарохимический способ

Ключевые слова

shale oil; thermal methods;
powder charges; flameless
combustion; crack opening;
thermobarochemical method

сланцах, в арктических и глубоководных зонах, а также увеличение нефтеотдачи на ранее разработанных месторождениях. Однако их освоение значительно повышает себестоимость добычи сырья. Так, по данным на 2014 г., приведенным в работе [1], себестоимость добычи традиционной нефти в среднем составляет 5–30 долл./барр. нефти, глубоководной и арктической нефти 30–50 долл./барр. нефти, нетрадиционной нефти (сланцевой нефти) 50–90 долл./барр. нефти. Поэтому исследователями продолжают поиски инновационных способов добычи нетрадиционной нефти, позволяющие снизить себестоимость добычи.

В настоящее время одним из перспективных направлений является добыча углеводного сырья в горючих сланцах. Так, согласно работе [2], Россия занимает 3 место по запасам сланцевой нефти, уступая лишь США и Китаю (рисунок 1). Мировой запас составляет 689277 млн т.

В настоящее время сдерживающими факторами разработки месторождений со сланцевой нефтью являются несовершенство применяемых методов, низкая нефтеотдача пластов и прочее.

Для повышения эффективности существующих способов добычи и выбора альтернативного способа при добыче сланцевой нефти был проведен анализ традиционных способов добычи и дополнительных воздействий на призабойную зону пласта. Так как в ранней стадии разработки сланцевых месторождений в основном применяли вертикальные скважины, это тормозило использование современных технологий из-за небольшой мощно-

сти пласта. Прорыв в добыче сланцевой нефти свершился при внедрении в практику наклонно-направленного бурения, что дало возможность увеличить протяженность призабойной зоны кратно и любое воздействие давало результат.

Однако все имеющиеся технологии добычи сланцевой нефти обладают существенными недостатками. При добыче сланцевой нефти в основном применяется «фрекинг», то есть гидроразрыв пласта (Hydraulic Fracking) и при этом происходит небольшое землетрясение с непредсказуемыми последствиями, особенно в сейсмочувствительных зонах добычи нефти. И исследования указывают на такой риск при искусственной сейсмической активности. В работе [3] отмечается высокий темп снижения дебита в течение нескольких лет (темп падения до 70–80 %, от первоначального) из-за сверхнизкой проницаемости и закрытия трещин. Традиционный способ добычи сланцевой нефти приносит колоссальный вред экологии, что осложняет разработку сланцевых месторождений. При разработке новых технологий уделяют большое внимание данной проблеме. Многие ученые, а также отечественные и зарубежные компании по добыче работают над решением проблем в области технологии и техники разработки сланцевой нефти. Так, основными способами повышения нефтеотдачи можно считать: способы на основе закачки газов [4]; способы, связанные с закачкой химических растворов на водной основе [5]; способы по тепловой обработке призабойной зоны [6]; способы, связанные с биологическим воздействием [7].

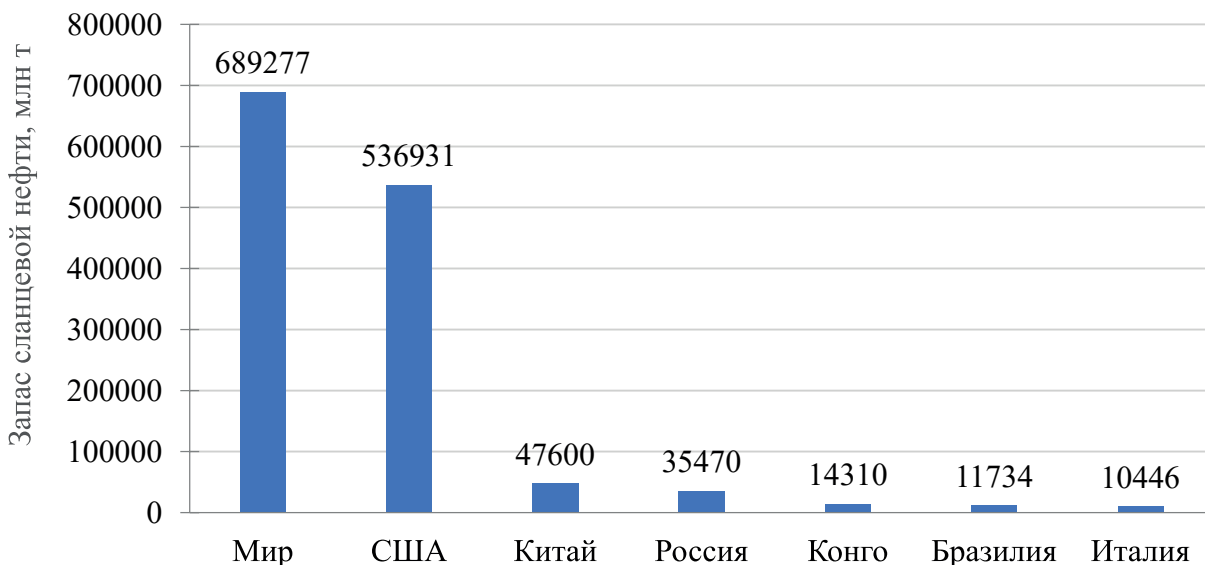


Рисунок 1. Мировые запасы сланцевой нефти по состоянию на 2008 г. по данным [2]

Авторы, проанализировав способы добычи сланцевой нефти, пришли к выводу, что для эффективной добычи можно использовать традиционные способы воздействия на призабойную зону пласта. Выбор метода воздействия на призабойную зону, в первую очередь, определяется пластовыми условиями. Рассмотрев многие прогрессивные методы воздействия на призабойную зону пласта, мы пришли к выводу, что наиболее оптимален способ термобарохимической обработки (далее ТБХО) скважин. Прежде всего хотелось отметить, что способ ТБХО значительно отличается от многих других методов экономическим преимуществом и простотой обработки, а также утилизацией твердых и пороховых зарядов без воздействия на окружающую среду.

Анализ показал, что группой российских специалистов [6, 8–15] были предложены комплексные технологии термобарохимического воздействия на пласт, при которых исключалось ударное воздействие на обсадную колонну, на цементный камень и влияние гидроразрыва пласта на окружающую среду. В один комплекс данной технологии сведены три метода обработки скважин: метод термогазохимического воздействия (ТГХВ) с использованием пороховых зарядов длительного горения, химического, гидроимпульсного и депрессионного воздействия [8, 10, 16]. В нашем случае мы запатентовали метод ТБХО спускаемых в забой скважин зарядов на насосно-компрессорных трубах. За рубежом используется два основных термина в связи с повышением эффективности разработки не-

фтяных месторождений: повышение нефтеотдачи (EOR — Enhanced Oil Recovery) и улучшение нефтеотдачи (IOR — Improved Oil Recovery). Среди новых методов EOR и IOR для нас наибольший интерес представляют методы термического воздействия или тепловые методы, которые позволяют достичь того или иного результата. По заключению американских специалистов, внедрение этих методов позволит увеличить извлечение нефти из недр почти в два раза. В США разработано свыше 400 проектов по использованию различных модификаций этих методов в практике нефтедобывающих работ.

Коллективом НПФ «Использование конденсированных энергетических систем в нефтедобыче (НПФ «ИКЭС-нефть», г. Уфа)» разработаны и внедрены свои технология ТБХО [12], они опробованы и успешно применяются на месторождениях нефтегазодобывающих компаний как в России (90 скв.), так и в Республике Казахстан (более 100 скв.) [13, 16]. При этом получено повышение продуктивности после проведения ТБХО в 3 раза и более. На рисунке 2 приведена диаграмма давления и температуры на забое скв. 4345 Арланского месторождения при ТБХО по технологии НПФ «ИКЭС-нефть» [10, 12].

Решающее значение в технологиях ТБХО имеет вес порохового заряда. Большой вес заряда приводит к гидроразрыву пласта, созданию каналов, трещин и увеличению проницаемости пласта в призабойной зоне, что необходимо при добыче сланцевой нефти, причем гидроразрыв очень щадящий, без влияния на окружающую среду. В качестве реагента для

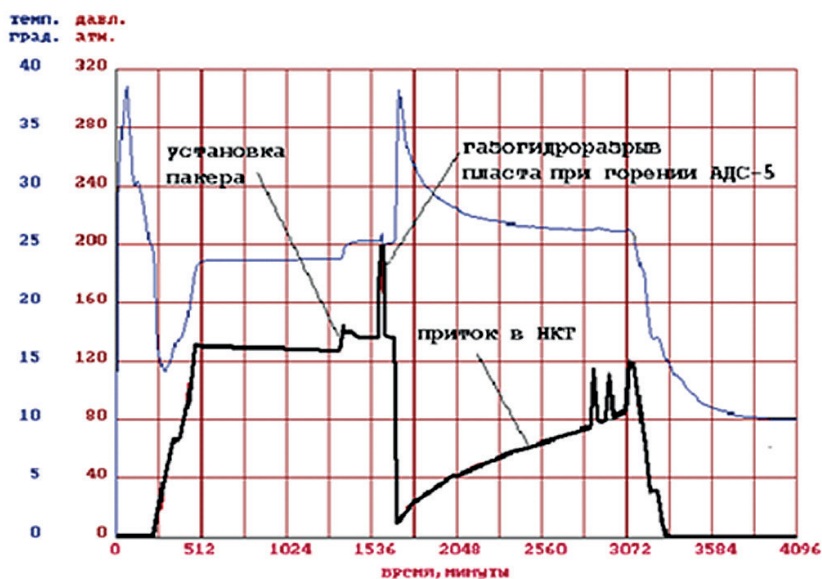
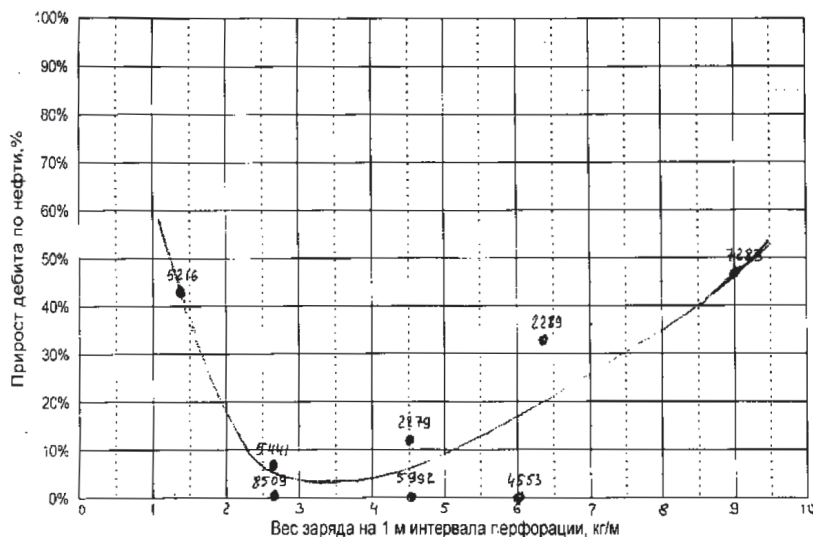


Рисунок 2. Диаграмма давления и температуры на забое скв. 4345

заполнения трещин и каналов использовали растворители АСПО и порошкообразный материал «Полисил, обладающий гидрофобными свойствами, который растворяли с помощью дизтоплива или нефраса» [16]. На рисунке 3 показана зависимость прироста дебита сква-

жины от погонного веса порохового заряда на 1 м интервала перфорации по результатам обработки трубным методом ТБХО восьми скважин «Узеньского» месторождения. В герметичной скважине необходимый рост давления обеспечивается пороховыми зарядами.



Шифр значений — номера скважин

Рисунок 3. Зависимость геологического эффекта ТБХО от веса АДС

На основании выполненных теоретических и практических исследований, а также опираясь на результаты внедрения термобарохимического способа увеличения нефтеотдачи пластов, при участии авторов предложен способ добычи сырья.

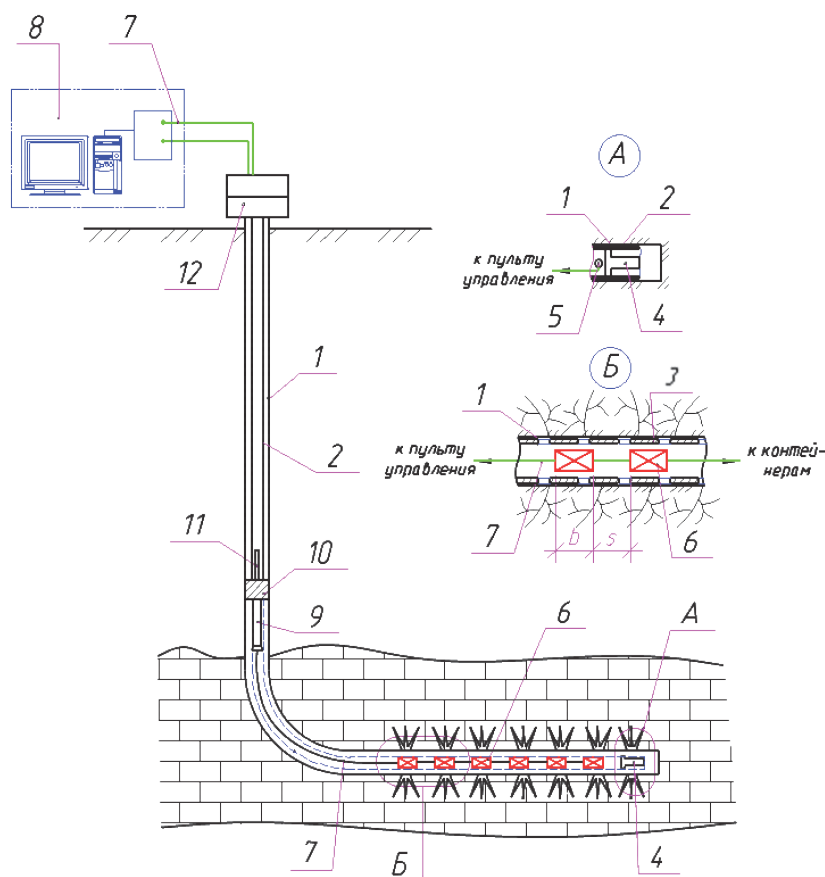
Суть способа заключается в том, что увеличение нефтеотдачи обеспечивается нагревом продуктами газификации при длительном беспламенном горении пороховых зарядов. Этот способ ориентирован для случаев устройства скважин наклонно-направленного бурения. Принципиальная схема расположения основных элементов скважины при этом способе [17] приведена на рисунке 4.

Беспламенное горение происходит за счет экзотермического разложения специальных порохов при низком давлении [18]. Для этого вида горения необходимо применять пороховые заряды на основе кордита, баллистит и белого пороха. В некоторых случаях можно применять утилизированные компоненты, извлеченные из ракетных двигателей, а также огнестрельного оружия и артиллерии, в том числе баллистических снарядов.

Для создания беспламенного горения необходимо в горизонтальный участок скважины поместить контейнеры с пороховыми зарядами и последовательно или в определен-

ном порядке соединить их в электрическую цепь. Доставка контейнеров в приобойную зону скважины осуществляется на порожних трубах. После их доставки и соединения в цепь контейнеры воспламеняются с помощью подачи напряжения. Воспламенение пороховых зарядов производится через геофизический кабель, который соединен с пультом управления. При выборе схемы нагрева пороховых зарядов последовательным способом необходимо обеспечивать требуемую термоизоляцию проводов, так как может произойти обрыв электрической цепи. Горение беспламенных зарядов длится в течение десятков минут. Это возможно за счет низкой линейной скорости горения, в отличие от других типов горения. Нагретые продукты газификации диффундируют в нефтеносный пласт, нагревают его и увеличивают его капиллярность, повышая нефтеотдачу.

Температура в зоне дымогазовой среды не постоянная и меняется от расстояния от источника воспламенения [19]. Так, при начальном горении эта температура может составлять 330 °С на поверхности источника, а при двухпламенном горении на удалении 680 °С. Очевидно, что температура будет зависеть от длины обрабатываемой зоны, а также количества применяемых пороховых зарядов, их кон-



1 — скважина наклонно-направленного бурения; 2 — обсадная колонна; 3 — горизонтальный участок скважины с перфорированной обсадной трубой; 4 — тупиковый хвостик; 5 — логгер (цифровой датчик) регистрации температуры и давления; 6 — контейнер с пакетами пороховых зарядов; 7 — электрический кабель; 8 — пульт управления; 9 — фильтр; 10 — пакерно-якорный узел; 11 — логгер (цифровой датчик) для регистрации температуры и давления; 12 — уплотнитель устья

Рисунок 4. Принципиальная схема добычи сланцевой нефти с использованием беспламенного горения

фигурации (диаметр, длина и прочее) и последовательности их горения. В случае плотной упаковки пласта на фронте горения температура может достигать 1000 °С.

Контейнеры с пороховыми зарядами необходимо закладывать в ствол скважины с шагом от 0,25 до 1,0 м. Оптимальный шаг расстановки контейнеров в каждом случае выбирается с учетом результатов термодинамических расчетов, руководствуясь тем, что при коротком нагреве пласта эффект от изменения текучести углеводородного сырья незначителен, а при длительном воздействии может произойти оплавление геологических пород с образованием силикатов пласта, препятствующих эффективной добыче.

При горении пороховых зарядов выделяются продукты газификации, основными составляющими которых являются NO, CO₂, CO [19]. Они проникают в капиллярно-пористую среду пласта через перфорированный участок обсадной трубы скважины. При этом происходит постепенно «плавное» увеличение дав-

ления, которое приводит к трещинообразованию, а также увеличению раскрытия естественных трещин. Проникая в трещины, продукты газификации нагревают газожидкостную смесь пласта. Нагрев пласта является своего рода «катализатором» для повышения текучести углеводородного сырья и последующего локального увеличения нефтеотдачи продуктивного пласта.

С целью герметизации обрабатываемой зоны скважины ствол скважины экранируется системой «пакер — якорь», обеспечивая стабильное поддержание давления и температуры.

По окончании нагрева пласта из скважины демонтируется технологическое оборудование, и скважину промывают с помощью депрессионной камеры с гидроимпульсным воздействием.

Заключительным этапом является добыча углеводородного сырья из продуктивного пласта традиционными методами.

Вывод

На основании проведенного анализа способов тепловых способов добычи сланцевой нефти предложен оптимальный способ, основанный на использовании пороховых зарядов,

обеспечивающих беспламенное горение и продолжительный нагрев пласта, который ведет к увеличению нефтедобычи и снижению ее себестоимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aguilera R.F. Production Costs of Global Conventional and Unconventional Petroleum // *Energy Policy*. 2014. Vol. 64. P. 134–140. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.118.

2. Kang Z., Zhao Y., Yang D. Review of Oil Shale in-Situ Conversion Technology // *Applied Energy*. 2020. Vol. 269. P. 115–121.

3. Zeng T., Miller C.S., Mohanty K.K. Combination of a Chemical Blend with CO₂ Huff-n-Puff for Enhanced Oil Recovery in Oil Shales // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 194. P. 107–546.

4. Sanchez-Rivera D., Mohanty K., Balhoff M. Reservoir Simulation and Optimization of Huff-and-Puff Operations in the Bakken Shale // *Fuel*. 2015. Vol. 147. P. 82–94. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.062

5. Mohanty K.K., Tong S., Miller C., Honarpour M.M., Turek E., Peck D.D. Improved Hydrocarbon Recovery using Mixtures of Energizing Chemicals in Unconventional Reservoirs // *Materials of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA. 2017. SPE-187240-MS. DOI: 10.2118/187240-MS.

6. Курмаев С.А., Кусакин Ю.Н., Абдуллин В.М., Аглиуллин М.М., Абдуллин М.М. Комплексный метод термобарохимической обработки призабойной зоны нефтяных скважин // *Нефтегазовое дело*. 2006. Т. 4. № 1. С. 121–126.

7. Nikolova C., Gutierrez T. Use of Microorganisms in the Recovery of Oil From Recalcitrant Oil Reservoirs: Current State of Knowledge, Technological Advances and Future Perspectives // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 10. P. 29–96. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02996.

8. Аглиуллин М.М. Новые термобарохимические технологии обработки призабойной зоны пластов // *Каротажник*. 2002. № 92.

9. Еникеев М.Д. Обработка скважин термобаровоздействием на месторождениях Пермской области // *Нефтяное хозяйство*. 1999. № 4.

10. Аглиуллин М.М., Абдуллин В.М., Абдуллин М.М., Курмаев С.А. Разработка и внедрение термобарохимического метода увеличения продуктивности нефтегазовых скважин // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2004. № 2. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Agliullin/Agliullin_1.pdf (дата обращения: 13.08.2020).

11. Родионов И. Интенсификация добычи нефти на месторождениях ОАО «ЛУКОЙЛ» // *Нефтеотдача*. 2002. № 5. URL: <https://ikesoil.ru/data/documents/Statya-v-Kapitale-TVHO-v-Lukoyle.htm> (дата обращения: 14.08.2020).

12. Пат 2123591 РФ, МПК Е 21 В 49/00. Способ обработки прискважинной зоны пласта и устройство для его осуществления / М.М. Аглиуллин, А.С. Курмаев, Р.Х. Рахматуллин, М.М. Абдуллин. 96112275/03, Заявлено 18.06.1996; Опубл. 20.12.1998.

13. Пат. 17779 Казахстан. Способ термобарохимической обработки призабойной зоны пластов и устройство для его осуществления / В.М. Абдуллин. 15.09.2006.

14. Абдуллин М.М., Аглиуллин М.М., Фазылов Р.Г. Техника и технология интенсификации нефтяных скважин комплексным термобаровоздействием // *Каротажник*. 1997. № 38. С. 112–113.

15. Пат. 2240425 РФ, МПК Е 21 В 43/24. Устройство для термобарохимической обработки призабойной зоны скважины / М.М. Аглиуллин, А.С. Курмаев, В.М. Абдуллин, Ю.Н. Кусакин. 2002121235/03, Заявлено 05.08.2002; Опубл. 20.11.2004. Бюл. 32.

16. Геолого-технический отчет. Опытно-промышленные работы по обработке призабойной зоны нефтяных скважин по термобарохимическим технологиям. Жанаозен, 2002.

17. Пат. 2697339 РФ, МПК Е 21 В 43/24. Способ добычи сланцевой нефти / М.М. Абдуллин, П.А. Федоров, В.М. Абдуллин, С.А. Курмаев, О.А. Федорова. 2018134829, Заявлено 01.10.2018; Опубл. 13.08.2019. Бюл. 23.

18. Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973. 176 с.

19. Похин П.Ф. О механизме горения бездымных порохов // *Физика взрыва*. Сборник № 2 экспериментальных научно-исследовательских работ в области физики взрыва. М.: Издательство Академии наук СССР, 1953. С. 181–212.

REFERENCES

1. Aguilera R.F. *Production Costs of Global Conventional and Unconventional Petroleum*. *Energy Policy*, 2014, Vol. 64, pp. 134–140. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.118.

2. Kang Z., Zhao Y., Yang D. Review of Oil Shale in-Situ Conversion Technology. *Applied Energy*, 2020, Vol. 269, pp. 115–121.

3. Zeng T., Miller C.S., Mohanty K.K. Combination of a Chemical Blend with CO₂ Huff-n-Puff for Enhanced Oil Recovery in Oil Shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, Vol. 194, pp. 107–546.

4. Sanchez-Rivera D., Mohanty K., Balhoff M. Reservoir Simulation and Optimization of Huff-and-Puff Operations in the Bakken Shale. *Fuel*, 2015, Vol. 147, pp. 82–94. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.062

5. Mohanty K.K., Tong S., Miller C., Honarpour M.M., Turek E., Peck D.D. Improved Hydrocarbon Recovery using Mixtures of Energizing Chemicals in Unconventional Reservoirs. *Materials of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, 2017, SPE-187240-MS. DOI: 10.2118/187240-MS.

6. Kurmaev S.A., Kusakin Yu.N., Abdullin V.M., Agliullin M.M., Abdullin M.M. Kompleksnyi metod termobarokhimicheskoi obrabotki prizaboinoi zony neftyanykh skvazhin [Complex Thermobarochemical Treatment of the Bottomhole Zone]. *Neftegazovoe delo* —

Petroleum Engineering, 2006, Vol. 4, No. 1, pp. 121–126. [in Russian].

7. Nikolova C., Gutierrez T. Use of Microorganisms in the Recovery of Oil From Recalcitrant Oil Reservoirs: Current State of Knowledge, *Technological Advances and Future Perspectives. Frontiers in Microbiology*, 2020, Vol. 10, pp. 29–96. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02996.

8. Agliullin M.M. Novye termobarokhimicheskie tekhnologii obrabotki prizaboinoi zony plastov [New Thermobarochemical Technologies for Treatment of Bottomhole Formation Zones]. *Karotazhnik — Karotazhnik*, 2002, No. 92. [in Russian].

9. Enikeev M.D. Obrabotka skvazhin termobarovozdeistviem na mestorozhdeniyakh Permskoi oblasti [Treatment of Wells with Thermal Pressure in the Fields of the Perm Region]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 1999, No. 4. [in Russian].

10. Agliullin M.M., Abdullin V.M., Abdullin M.M., Kurmaev S.A. Razrabotka i vnedrenie termobarokhimicheskogo metoda uvelicheniya produktivnosti neftegazovykh skvazhin [Development and Implementation of a Thermobarochemical Method for Increasing the Productivity of Oil and Gas Wells]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2004, No. 2. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Agliullin/Agliullin_1.pdf (accessed 13.08.2020). [in Russian].

11. Rodionov I. Intensifikatsiya dobychi nefiti na mestorozhdeniyakh OAO «LUKOIL» [Stimulation of Oil Production at the Fields of OJSC LUKOIL]. *Nefteotdacha — Oil Recovery*, 2002, No. 5. Available at: <https://ikesoil.ru/data/documents/Statya-v-Kapitale-TBHO-v-Lukoyle.htm> (accessed 14.08.2020). [in Russian].

12. Agliullin M.M., Kurmaev A.S., Rakhmatullin R.Kh., Abdullin M.M. *Sposob obrabotki priskvazhinnoi zony plasta i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for Treatment of Near-Wellbore Formation Zone and Device for its Implementation]. Patent RF, No. 2123591, 1998. [in Russian].

13. Abdullin V.M. *Sposob termobarokhimicheskoi obrabotki prizaboinoi zony plastov i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of Thermobarochemical Treatment of Bottomhole Formation Zone and Device for Its Implementation]. Patent 17779, Kazakhstan, 2006.

14. Abdullin M.M., Agliullin M.M., Fazylov R.G. Tekhnika i tekhnologiya intensivatsii neftyanykh skvazhin kompleksnym termobarovozdeistviem [Technique and Technology of Stimulation of Oil Wells by Complex Thermal Pressure]. *Karotazhnik — Karotazhnik*, 1997, No. 38, pp. 112–113. [in Russian].

15. Agliullin M.M., Kurmaev A.S., Abdullin V.M., Kusakin Yu.N. *Ustroistvo dlya termobarokhimicheskoi obrabotki prizaboinoi zony skvazhinny* [Device for Thermobarochemical Treatment of the Bottomhole Zone of the Well]. Patent RF, No. 2240425, 2004. [in Russian].

16. *Geologo-tekhnicheskii otchet. Opytno-promyshlennyye raboty po obrabotke prizaboinoi zony neftyanykh skvazhin po termobarokhimicheskim tekhnologiyam* [Geological and Technical Report. Pilot Work on Treatment of the Bottomhole Zone of Oil Wells Using Thermobarochemical Technologies]. Zhanaozen, 2002. [in Russian].

17. Abdullin M.M., Fedorov P.A., Abdullin V.M., Kurmaev S.A., Fedorova O.A. *Sposob dobychi slantsevoi nefiti* [Shale Oil Production Method]. Patent RF, No. 2697339, 2019. [in Russian].

18. Novozhilov B.V. *Nestatsionarnoe gorenie tverdykh raketnykh topliv* [Unsteady Combustion of Solid Rocket Fuels]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 176 p. [in Russian].

19. Pokhin P.F. O mekhanizme goreniya bezdymnykh porokhov [About the Mechanism of Combustion of Smokeless Propellants]. *Fizika vzryva. Sbornik № 2 eksperimental'nykh nauchno-issledovatel'skikh rabot v oblasti fiziki vzryva* [Explosion Physics. Collection No. 2 of Experimental Research Works in the Field of Explosion Physics]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR Publ., 1953, pp. 181–212. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Абдуллин Марат Мансурович, канд. техн. наук, профессор кафедры «Комплексный инжиниринг и компьютерная графика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Marat M. Abdullin, Candidate of Engineering Sciences, Professor of Integrated Engineering and Computer Graphics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ingenernaya_grafika@mail.ru

Федоров Павел Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Pavel A. Fedorov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Building Structures Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: fpa_idpo@mail.ru

Абдуллин Валерий Маратович, канд. техн. наук, главный технолог отдела сопровождения проекта T и T, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Россия

Valery M. Abdullin, Candidate of Engineering Sciences, Chief Technologist of the T and T Project Support Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: a_valeriy@mail.ru