



И.А. Лягов
канд. техн. наук
ООО «Перфобур»¹
генеральный директор
ilyagov@perfobur.com



И.Р. Галас
ООО «Перфобур»
директор по развитию
galas@perfobur.com

Техническая система «Перфобур» для строительства разветвленных каналов сверхмалого диаметра и радиуса кривизны из обсаженного ствола скважины

¹Россия, 115114, Москва, Дербеневская набережная, 11, этаж 3, помещение 65, каб. 4, 5.

В статье рассмотрены этапы создания технической системы «Перфобур» (ТС), отмечен ряд преимуществ ТС, а также выделены основные области применения данной технологии. Авторами проанализированы опытно-промышленные работы ранее созданной ТС в цикле строительства глубоких перфорационных каналов малого диаметра по прогнозируемой траектории. Выделяются и описываются характерные особенности уникального стенда компании «Перфобур», на основе которого проводятся испытания для проверки и анализа работоспособности как отдельных узлов, так и компоновок в целом под определенные диаметры и группы прочности обсадных колонн

Ключевые слова: опытно-промышленные работы; скважина; унифицированный перфобур; испытательный стенд; вторичное вскрытие продуктивного пласта; радиальное бурение

Вторичное вскрытие продуктивных коллекторов (ПК) исследуемого и осваиваемого объекта считается одним из сложных этапов заканчивания скважин как при строительстве, реконструкции, так и при их капитальном ремонте, поэтому всегда вызывало особое отношение специалистов – нефтяников и газовиков. Как правило, загрязнение призабойной зоны при первичном вскрытии зачастую достигает нескольких метров, что делает практически невозможным гидравлически совершенную связь скважины с продуктивным пластом, несмотря на использование различных современных технологий вторичного вскрытия [1, 10–13]. Одной из перспективных, развивающихся технологий является комплексная технология бурения разветвленных каналов сверхмалого диаметра (60–70 мм) и радиуса кривизны (3,5–12 м) по контролируемой (прогнозируемой) траектории специальными компоновками с малогабаритными секционными забойными двигателями (ВЗД) из обсаженного ствола скважины. Техническая система «Перфобур» предназначена для повышения качества гидродинамической связи продуктивного пласта с пробуренной и обсаженной скважиной на завершающем этапе ее строительства или капитальном ремонте путем глубокой перфорации продуктивного интервала нефтяных и газовых скважин системой разветвлено-направленных каналов.

ТС «Перфобур» позволяеткратно увеличить площадь фильтрации (дренирования) добывающих и приемистость нагнетательных скважин при возможности регистрации траектории, её коррекции и многократном входе в пробуренный канал, например, при его ремонте, интенсификации притока пластового флюида в пределах увеличенного жизненного цикла [2, 15].

Как аккуратно выйти из закольматированной зоны, авторы проекта ТС «Перфобур» задумывались еще в прошлом веке при разработке щадящих методов вторичного вскрытия ПК, таких как щелевая и проколочная перфорация, применение имплозионных камер при кумулятивной перфорации для защиты цементного камня, шлангокабельных и колтюбинговых технологий [1].

Идея использования в качестве вторичного вскрытия ПК технологии бурения разветвленных каналов возникла как всегда случайно, после ознакомления с работами В.С. Федорова, С.И. Кувыкина, Н.Ф. Кагарманова и М.У. Муратова, рассматривавших различные предпосылки бурения стволов скважин малого диаметра. Техничко-экономическое обоснование строительства скважин малого диаметра впервые было сделано В.С. Федоровым еще в 50-х годах прошлого ве-

ка – отмечалось значительное сокращение объема разрушенной долотом породы, ускорение и удешевление первичного вскрытия ПЗП скважины за счет снижения подводимой мощности, которая по В.С. Федорову пропорциональна диаметру долота. Например, необходимая мощность для работы долот диаметром 215,9 мм составляет 50–250 кВт, а для долот диаметром 47,6–69,9 мм – всего 1,4–2 кВт.

Первый прототип оборудования с участием авторов проекта ТС «Перфобур» разработан группой специалистов Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ) в 2006 г. Проведено множество стендовых испытаний, в ходе которых была пробурена серия каналов длиной по несколько метров каждый. Правда, технология подразумевала удаление части эксплуатационной колонны и затем уже бурение каналов в открытом стволе [3].

В 2010 г. авторами начаты опытные работы на скв. № 952 Чермасанского месторождения, где испытана в действии первая бурильная компоновка с односекционным двигателем Д-43, спущенная на отметку 1421 м в вырезанном участке обсадной колонны диаметром 146 мм.

Промысловые испытания продолжались в 2011 г. со специальным секционным ВЗД на скв. № 506Н Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения ООО «Газпром добыча Оренбург».

Однако из-за ряда технологических и в большей степени – экономических просчетов разработка технической системы была приостановлена. Подробный анализ просчетов в техники и технологии авторами проекта проведен и научно обоснован в работах [2, 4].

В 2015 г. при финансовой и маркетинговой поддержке венчурных компаний *North Energy Ventures*, *Phystech Ventures* и фонда Сколково, работы по созданию ТС «Перфобур», но уже в модульном исполнении и для бурения каналов из обсаженного ствола скважины, продолжились.

Были заново проанализированы, разработаны и испытаны модули, узлы и инструменты – фрезы, долота, специальные секционные ВЗД различных типоразмеров, якорные извлекаемые и неизвлекаемые модули, система захватов, модуль клин-отклонитель, механическая ориентация и направленность бурения, клапанный модуль, гидронагружатели, гибкая и жесткая КНБК, инклинометрия каналов, насосно-циркуляционный комплекс с системой ДЭЛ 150. Отработаны аналитически и экспериментально на стенде технология фрезерования обсадных труб диаметров 139,7–177,8 мм и технология неориентированного наклонно-направленного

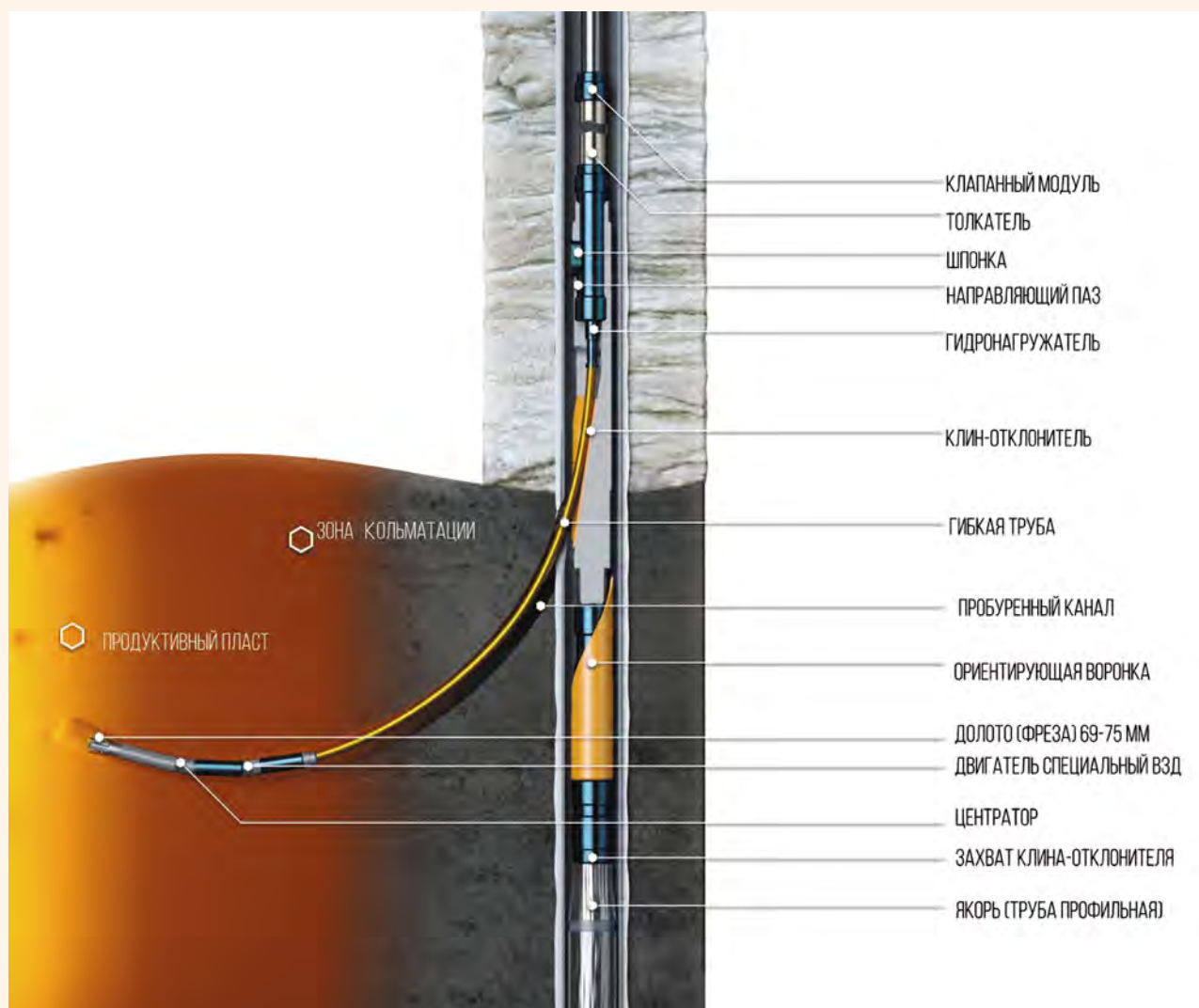


Рис. 1.
Схема технической системы «Перфобур»

бурения каналов длиной 10–14 м по заданной траектории в специальных цементно-песчаных блоках, изготовленных по стандартам API 19B.

Создание новой технической системы (рис. 1) соответствующего уровня качества и надежности наряду с выполнением конструкторских решений, созданием математических и феноменологических моделей, учитывающих условия её работы с аналитической реализацией, невозможно без оценки и анализа показателей надежности при всесторонней экспериментальной отработке опытных образцов и всей системы на стенде с имитацией различных воздействующих факторов, максимально приближенных к промышленным.

С этой целью в 2015 г. для проверки достоверности принимаемых решений в компании ООО «Перфобур» был разработан и изготовлен специальный стенд, который позволяет комплексно моделировать операции по фрезерованию «окна» в обсадной колонне, бурение кана-

ла через выфрезерованное «окно» посредством разрушения образцов горной породы и осуществления контроля прохождения геофизического прибора внутри пробуренного канала для анализа его траектории в условиях, оптимально возможно приближенных к реальным условиям в скважине.

Целью стендовых испытаний ТС «Перфобур» является проверка работоспособности всей системы, а также отдельных ее узлов в условиях, близких к скважинным, для выявления узлов конструкции, нуждающихся в доработке, а также для подбора оптимальных режимов фрезерования и бурения при работе оборудования в условиях, близких к скважинным.

Испытательный стенд ООО «Перфобур» включает в себя (рис. 2): песчано-цементный блок, емкость для промывочной жидкости, соединенную по средствам трубопровода с насосной станцией СИН-46, которая, в свою очередь, через рукав высокого давления подает



Рис. 2.

Испытание полноразмерной КНБК на экспериментальном стенде компании «Перфобур»

промывочную жидкость на гидронагрузатель и далее – в ТС.

Подача осевой нагрузки на горизонтально расположенную техническую систему «Перфобур» происходит посредством привода ходового винта, управляемого программно через персональный компьютер для возможности задания необходимой величины осевой нагрузки.

Для измерения осевой нагрузки в ходе стендовых испытаний использовался гидравлический динамометр – «месдоза», а для замеров величины давления – манометр.

Действие гидравлического динамометра основано на измерении давления жидкости, создаваемого передаваемой через поршень осевой силой в ограниченном цилиндре. Под давлением жидкость поступает по трубке в манометр с визуальным отображением на шкале прибора и трансформацией в цифровом виде с записью процесса.

Во время испытаний технической системы на стенде проверялась ее работоспособность при фрезеровании участка обсадной колонны и бурении песчано-цементного блока (моделирующих горную породу) при различных режимах нагружения ВЗД. В результате испытаний были подобраны долота и фрезы, состав бурильной

компоновки, а также определен оптимальный режим бурения и фрезерования.

Для возможности обеспечения оптимальной работы малогабаритных винтовых забойных двигателей, которые работают на расходах от 0,5 л/с до 1,6 л/с и достаточно чувствительны к пульсациям давления в нагнетательной линии, была закуплена насосная станция СИН-46, которая обеспечивала плавную работу двигателей на требуемых режимах.

В 2016 г. авторами разработана методология выбора оптимального варианта рабочих органов универсального высокомоментного малогабаритного ВЗД для технологической системы «Перфобур», которая позволила сконструировать секционный двигатель (47–49 мм) с улучшенными характеристиками по сравнению с серийными ВЗД [9].

Для проведения измерений параметров каналов использовался автономный магнитометрический инклинометр «Кварц» (рис. 3), изготовленный по техническому заданию ООО «Перфобур».

На рис. 3 представлена фотография инклинометра «Кварц» в составе компоновки «Перфобур» перед спуском в скважину для записи траектории.



Рис. 3.
Автономный инклинометр в составе компоновки «Перфобур» перед спуском в скважину

Для обеспечения работоспособности конструкции компоновки в процессе бурения канала важно знать силовой характер взаимодействия базовых узлов бурильной компоновки со стенками перфорационного канала – как в процессе забуривания, так и при бурении, когда компоновка находится внутри канала при различных значениях зенитных углов в процессе изменения его траектории, а также – качественный и количественный характер взаимодействия бурильной колонны со стенками канала, т.к. от показателей этой связи зависит функциональность и надежность оборудования [12].

Известно, что стабилизировать режим работы бурового оборудования и траекторию перфорационного канала можно путем установки опорно-центрирующих элементов в расчетных местах, но при резко изменяющихся механических свойствах горных пород, что с высокой степенью вероятности происходит при бурении каналов большой протяженности (более 35–50 м), эксплуатационной эффективности и оперативном управлении структурной устойчивостью КНБК этого метода уже недостаточно.

В 2017 г. было принято решение о использовании в ТС «Перфобур» КНБК, работающей как в режиме стабилизации, виброгашения, так и в качестве резонатора – осциллятора, в состав которой включаются гидромеханические демпферы – осцилляторы, шарнирные центраторы-кольмататоры, регуляторы азимута и зенитного углов гироскопического типа, которые позволят создавать необходимую осевую нагрузку на породоразрушающий и фрезерующий инструменты, эффективно гася продольные, поперечные и крутильные колебания как в процессе резки окна в обсадной колонне, так и при бурении ориентированных каналов, путем эффективного сопротивления любому отклоняющему воздействию, стремящему изменить спрогнозированную траекторию [6, 7, 8].

Многочисленные аналитические исследования, а также стендовые испытания, проводившиеся на специально созданном стенде ООО «Перфобур» полноразмерной компоновкой, показали работоспособность ТС при различных режимах ее работы [5]. Завершающие промысловые испытания, выполненные в феврале 2018 г. на реальной скв. № 10030 Арланского месторождения НГДУ «Арланнефть», подтвердили возможность бурения многозабойных (разветвленных) каналов протяженностью 7–14 м [14, 15].

Выводы


На сегодняшний день проведено 6 операций в компаниях ОАО «Нократойл», ООО «Башнефть добыча», АО «НОВАТЭК-Пур» и ООО «ЛУКОЙЛ-Коми». Геологическая эффективность проведенных работ составляет 83% (5 скважин из 6), технологическая – 100%.

В ООО «Башнефть добыча» проведены работы на трёх скважинах месторождений Арланское и Югомашевское. На каждой скважине были пробурены по 2 канала длиной 14 м каждый. Наиболее значительный эффект был достигнут на скважине Югомашевского месторождения, где была применена технология СКО пробуренных каналов с использованием гидромониторной насадки «Перфобур», которая позволяет проводить ОПЗ непосредственно внутри пробуренных каналов на удалении до 10 м от скважины. Кислота закачивается со скоростью истечения жидкости 100 м/с, что обеспечивает намыв четырёх дополнительных каверн в одной точке намыва. По сравнению со стандартным ОПЗ, к эффекту растворения породы кислотой добавляется эффект физического размыва породы. Точки намыва можно располагать через каждый метр. В одной точке намыва закачива-

ется 12 м³ кислоты. Скважина запущена с параметрами Qж 51 м³/сут, Qн 41 т/сут, обв. 11%.

В АО «НОВАТЭК-Пур» была проведена работа на газовой скважине терригенной залежи Валанжинского яруса. Глубина целевого пласта 3000 м. Проницаемость 14 мДа. Скважина была в бездействии по причине наличия ЗКЦ воды снизу. Заказчик выполнил работы по изоляции ЗКЦ. После чего специалисты «Перфобур» про-

бурили канал длиной 14 м. Скважина была запущена с дебитом 50 тыс м³/сут.

В ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» проведена работа на нефтяной скважине карбонатной залежи Серпуховского яруса. Глубина целевого пласта 2300 м. Проницаемость 20 мДа. Были пробурены четыре канала длиной 14 м каждый. Скважина запущена с параметрами Qж 50 м³/сут, Qн 43 т/сут, обв. 3%. 

Литература

1. Лягов А.В. Динамические компоновки для бурения забойными двигателями: дис... д-ра техн. наук: 05.02.13. Уфа. 2005. 480 с.
2. Лягов И.А. Обоснование и разработка технологии вторичного вскрытия продуктивных пластов разветвленными скважинами сверхмалого диаметра: дис... канд. техн. наук: 25.00.15. СПб., 2014. 211 с.
3. Лягов И.А. Анализ результатов промысловых испытаний технической системы «Перфобур». Аналитический синтез базовых узлов «Перфобура» повышенной надежности для бурения сверхдлинных каналов по прогнозируемой траектории // Нефтегазовое дело. 2014. № 1. С. 52–76.
4. Лягов А.В., Лягов И.А. Выбор допустимых радиусов кривизны скважин сверхмалого диаметра (каналов) для технической системы «Перфобур» // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 6. С. 47–52.
5. Лягов И.А., Лягов А.В., Сулейманов И.Н., Качемаева М.А. Создание технической системы «Перфобур» и исследование её работоспособности в сильно искривленном канале при вынужденных продольных колебаниях // Нефтегазовое дело. 2015. № 5. С. 45–105.
6. Ишемгузин И.Е., Лягов А.В., Ишемгузин Е.И. и др. Патент РФ № 2147669. Способ компоновки низа буровой колонны. 2000, бюл. № 11.
7. Лягов А.В. Патент 2674485 C1 RU E21 B4/02. Малогабаритный шпindel секционного винтового забойного двигателя. № 2017141481. Заявлено 29.11.2017.
8. Лягов А.В. Патент 195139 U1 RU E21 B4/02. Буровая компоновка с малогабаритным винтовым забойным двигателем. № 2019120556. Заявлено 25.12.2017.
9. Лягов И.А., Балденко Ф.Д., Лягов А.В., Ямалиев В.У., Лягова А.А. Методология расчета технической эффективности силовых секций малогабаритных винтовых забойных двигателей для системы «Перфобур» // Записки Горного Института. 2019. № 240, с. 694–700.
10. Analytical research and experimental tests on the technology for drilling small diameter channels with small radius of curvature / Lyagov I.A., Vasilev, N.I., Reich M., Mezzetti M. / Oil Gas European Magazine, Volume 40, Issue 3, 1 September 2014, Pages 124-129.
11. Lyagov, I.A. Bottomhole formation zone completion through ultra deep multibranch channels experimental research of a new technology/ Lyagov I. A. // Springer. Mine planning and equipment selection. Proceedings of the 22nd MPES Conference. 2013, Dresden Germany P.1221-1229.
12. M.: Society of Petroleum Engineers, 2013. С. 835–873.
13. Мальцев А.А., Лягов И.А., Лягов А.В. Разработка инновационной системы радиального бурения для повышения нефтеотдачи пласта // Нефть. Газ. Новации. 2016. № 11. С. 64–67. Лягов И.А., Лягова М.А. Технология вскрытия продуктивных пластов скважины бурением каналов малого диаметра и радиуса кривизны. Материалы конференции и выставки SPE по разработке месторождений в осложненных условиях и Арктике.
14. Губайдуллин А.Г., Могучев А.И., Ямалиев В.У., Лягов А.В. Расчет упруговязкопластического перемещения стенки открытого ствола скважины с учетом сжимаемости горной породы // Нефтяное хозяйство. 2018. № 2. С. 53–56.
15. Лягов И.А., Губайдуллин А.Г., Лягов А.В. и др. Прогнозирование рисков заклинивания для исключения возможности прихватов технической системы «Перфобур» при бурении разветвленных каналов в терригенных коллекторах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 126–136.

UDC 622.243.23

I.A. Lyagov, PhD, General Director, LLC “Perfobur”¹, ilyagov@perfobur.com
I.R. Galas, Director of Development, LLC “Perfobur”¹, galas@perfobur.com

¹11 Derbenevskaya nab naberezhnaya, floor 3, room 65, office. 4, 5, Moscow, 115114, Russia.

Creation of Perfobur technical system for drilling multipath ultraslim and small-curvature holes from cased wellbore

Abstract. The paper discusses the stages of creation of the Perfobur technical system and its advantages, and also highlights the main fields of this technology application. The authors analyse the field trials of the previously created technical system in the cycle of construction of the deep ultraslim perforations along the predicted path. The paper also highlights and describes the typical features of the Perfobur Company's test bench, which is the basis for functional check and analysis of operation of both separate units and arrangements for certain diameters and casing string grades.

Keywords: field trials; borehole; universal perfodrill; test bench; casing perforation of reservoir

References

1. Liagov A.V. *Dinamicheskie komponenty dlia bureniia zaboinymi dvigateliami* [Dynamic layouts for drilling with downhole motors]. Doctor of Technical Sciences dissertation: 05.02.13. Ufa. 2005. 480 s.
2. Liagov I.A. *Obosnovanie i razrabotka tekhnologii vtorichnogo vskrytiia produktivnykh plastov razvetlennymi skvazhinami sverkhmalogo diametra* [Substantiation and development of a technology for the secondary penetration of productive formations by branched wells of ultra-small diameter]. PhD dissertation: 25.00.15. Sankt Petersburg, 2014, 211 p.
3. Liagov I.A. *Analiz rezul'tatov promyslovnykh ispytaniy tekhnicheskoi sistemy «Perfobur». Analiticheskii sintez bazovykh uzlov «Perfobura» povyshennoi nadezhnosti dlia bureniia sverkhdlinnykh kanalov po prognozirovomoi traektorii* [Analysis of the results of field tests of the technical system "Perfobur". Analytical synthesis of basic units "Perfobur" of increased reliability for drilling extra-long channels along the predicted trajectory]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2014, no. 1, pp. 52–76.
4. Liagov A.V., Liagov I.A. *Vybor dopustimykh radiusov krivizny skvazhin sverkhmalogo diametra (kanalov) dlia tekhnicheskoi sistemy «Perfobur»* [The choice of permissible radii of curvature of ultra-small diameter wells (channels) for the technical system "Perfobur"]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz* [Exposition Oil Gas], 2014, no. 6, pp. 47–52.
5. Liagov I.A., Liagov A.V., Suleimanov I.N., Kachemaeva M.A. *Sozdanie tekhnicheskoi sistemy «Perfobur» i issledovanie ee rabotosposobnosti v sil'no iskrivlennom kanale pri vynuzhdennykh prodol'nykh kolebaniyakh* [Creation of the technical system "Perfobur" and the study of its performance in a strongly curved channel with forced longitudinal vibrations]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2015, no. 5, pp. 45–105.
6. Ishemguzhin I.E., Liagov A.V., Ishemguzhin E.I. i dr. Patent RF № 2147669. *Sposob komponovki niza buril'noi kolonny* [Method of assembling the bottom of the drill string]. 2000, bull. № 11.
7. Liagov A.V. Patent 2674485 S1 RU E21 V4/02. *Malogabaritnyi shpindel' sektiionnogo vintovogo zaboinogo dvigatel'ia* [Small-sized spindle of a sectional screw downhole motor]. № 2017141481. 29.11.2017.
8. Liagov A.V. Patent 195139 U1 RU E21 V4/02. *Buril'naia komponovka s malogabaritnym vintovym zaboinym dvigatelem* [Drilling assembly with a small-sized downhole screw motor]. № 2019120556. 25.12.2017.
9. Liagov I.A., Baldenko F.D., Liagov A.V., Iamaliev V.U., Liagova A.A. *Metodologiya rascheta tekhnicheskoi effektivnosti silovykh seksii malogabaritnykh vintovykh zaboinykh dvigatelei dlia sistemy «Perfobur»* [Methodology for calculating the technical efficiency of power sections of small-sized downhole motors for the Perfobur system]. *Zapiski Gornogo Instituta* [Notes of the Mining Institute], 2019, no. 240, pp. 694–700.
10. Analytical research and experimental tests on the technology for drilling small diameter channels with small radius of curvature / Liagov I.A., Vasilev, N.I., Reich M., Mezzetti M. / *Oil Gas European Magazine*, Volume 40, Issue 3, 1 September 2014, Pages 124–129.
11. Liagov, I.A. Bottomhole formation zone completion through ultra deep multibranch channels experimental research of a new technology/ Liagov I. A.//Springer. Mine planning and equipment selection. Proceedings of the 22nd MPES Conference. 2013, Dresden Germany P.1221-1229.
12. M.: Society of Petroleum Engineers, 2013. S. 835–873.
13. Mal'tsev A.A., Liagov I.A., Liagov A.V. *Razrabotka innovatsionnoi sistemy radial'nogo bureniia dlia povysheniia nefteotdachi plasta* [Development of an innovative system for radial drilling for enhanced oil recovery]. *Neft'. Gaz. Novatsii* [Oil. Gas. Innovations], 2016, no. 11, pp. 64–67. Liagov I.A., Liagova M.A. *Tekhnologiya vskrytiia produktivnykh plastov skvazhiny bureniem kanalov malogo diametra i radiusa krivizny* [The technology of opening productive layers of a well by drilling channels of small diameter and radius of curvature]. Proc. Of the conf.
14. Gubaidullin A.G., Moguchev A.I., Iamaliev V.U., Liagov A.V. *Raschet uprugoviazkoplasticheskogo peremeshcheniia stenki otkrytogo stvola skvazhiny s uchetom szhimaemosti gornoj porodny* [Calculation of elastic-viscoplastic displacement of the wall of an open wellbore taking into account the compressibility of the rock]. *Neftianoe khoziaistvo* [Oil industry], 2018, no. 2, pp. 53–56.
15. Liagov I.A., Gubaidullin A.G., Liagov A.V. i dr. *Prognozirovaniye riskov zaklinivaniia dlia isklucheniia vozmozhnosti prikhvatov tekhnicheskoi sistemy «Perfobur» pri burenii razvetlennyykh kanalov v terrigennykh kollektorakh* [Prediction of jamming risks to exclude the possibility of sticking of the technical system "Perfobur" when drilling branched channels in terrigenous reservoirs]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2019, vol. 330, no. 10, pp. 126–136.