

УДК 622.276

Р.А. Дерендяев^{1,2}, К.А. Дерендяев¹**R.A. Derendyaev^{1,2}, K.A. Derendyaev¹**¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет
²ООО «Лукойл-Пермь»¹Perm National Research Polytechnic University
²LLC "LUKOIL-Perm"

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВОДОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ НА ВИЗЕЙСКОМ ОБЪЕКТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЕРМСКОГО КРАЯ

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF CARRYING OUT OF WATER-INSULATING WORKS ON THE VISEAN OBJECT OF THE DEPOSIT OF THE PERM REGION

На текущий момент времени рост обводненности добываемой продукции является одной из причин, способствующей выходу скважин из эксплуатации. На месторождениях Пермского края насчитывается около 2,5 тыс. нефтяных скважин, и в 30 % из них продукция содержит более 70 % воды. Снижению обводненности добываемой продукции способствует проведение мероприятий по ограничению водопритока. Значительное количество воды в добываемой продукции скважин способствует увеличению скорости коррозии насосного оборудования, увеличивается скорость отложения солей, а также приводит к повышенной нагрузке на систему сбора и подготовки нефти. Эффективность работ по ограничению водопритока может быть увеличена при определении оптимальных геолого-технических условий применения технологий. При планировании водоизоляционных работ (ВИР) важным этапом является подбор скважин-кандидатов. В ряде случаев из-за низкой эффективности ВИР не обеспечивается выполнение поставленной задачи, что обуславливает уменьшение прибыли предприятия. Выполнен статистический анализ геологических и технологических факторов с целью оценки их влияния на эффективность мероприятия. В результате выполнения работы получена методика выбора скважин-кандидатов для проведения мероприятий по ограничению водопритока, которая позволит повысить успешность проведения операций и снизить затраты на ремонтные работы.

Ключевые слова: водоизоляционные работы, технологическая эффективность, регрессионный анализ, прогноз, многофакторный анализ, математическая модель, экспресс-оценка.

At the current time, an increase in water cut in produced products is one of the reasons contributing to the decommissioning of wells. There are about 2.5 thousand oil wells in the Perm Krai fields, and 30 % of them produce more than 70 % of water. Measures to limit water inflows contribute to a decrease in water cut in extracted products. A significant amount of water in the produced well products contributes to an increase in the corrosion rate of pumping equipment, an increase in the rate of salt deposition, and also leads to an increased load on the oil collection and treatment system. The effectiveness of work to limit water inflow can be increased in determining the optimal geological and technical conditions for the application of technologies. When planning water insulation works, an important stage is the selection of candidate wells. In some cases, due to the low efficiency of water insulation

works, the task is not achieved, which leads to a decrease in the profit of the enterprise. The article performed a statistical analysis of geological and technological factors in order to assess their impact on the effectiveness of the event. As a result of the work, a methodology was obtained for selecting candidate wells for measures to limit water inflow, which will increase the success of operations and reduce the cost of repair work.

Keywords: water-isolation works, technological efficiency, regression analysis, forecast, multi-factory analysis, mathematical model, express-score.

Авторами рассматривается визейский объект одного из месторождений Пермского края, характеризующийся высокой обводненностью добываемой продукции и незначительным дебитом нефти добывающих скважин, что приводит к неполной выработке запасов, а также к снижению коэффициента эксплуатации добывающего фонда (в связи с интенсивной коррозией и солеотложением). Данные обстоятельства обуславливают необходимость применения методов интенсификации добычи и проведения водоизоляционных работ по данной категории скважин. Содержание воды в продукции скважин может увеличиваться вследствие ее поступления из продуктивных высокопроницаемых горизонтов ниже или выше залегающих пластов, а также из-за прорыва подошвенных вод [1–9].

Для статистического анализа эффективности проведения мероприятий по ограничению водопритока необходимо, чтобы технологии их выполнения по всей выбранной совокупности скважин были аналогичны. По результатам проведения мероприятий за период с 2011 по 2018 г. на исследуемом объекте месторождения для анализа было отобрано 33 скважины, в которые закачивался гелеобразующий состав с его докреплением или без докрепления цементным составом. Важным условием выбора скважин была возможность получения максимально полной исходной информации для анализа.

В качестве критерия экономической эффективности ВИР была принята рентабельность дополнительной добычи нефти за счет их проведения. Успешность выполнения ВИР определялась на основе анализа их окупаемости в течение одного календарного года за счет дополнительной добычи нефти. Таким образом, работы считаются успешными, если показатель рентабельности в течение одного календарного года составляет больше единицы, т.е. затраты на проведение ВИР полностью окупаются. Рентабельность ВИР в течение года рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\Pi}{Z_{\text{общ}}} = \frac{(Q_{\text{после}} - Q_{\text{до}}) \cdot 365 \cdot (\Pi_{\text{прод}} - C_{\text{доб}})}{C_{\text{доб}} \cdot 365 \cdot Q_{\text{после}} + C_{\text{ВИР}}},$$

где Π – прибыль после получения дополнительной добычи, руб; $Z_{\text{общ}}$ – общие затраты, руб.; $Q_{\text{после}}$ – дебит нефти по скважине после проведения ВИР, т/сут; $Q_{\text{до}}$ – дебит нефти по скважине до проведения ВИР, т/сут; $\Pi_{\text{прод}}$ – цена прода-

жи нефти, руб/т; $C_{\text{доб}}$ – себестоимость добычи нефти, руб/т; $C_{\text{ВИР}}$ – средняя стоимость проведения водоизоляционных работ в скважинах ООО «Лукойл-Пермь», руб/скв.-опер.

Для прогноза рентабельности ВИР необходимо знать дебит скважины после проведения этих работ. В качестве критерия эффективности ВИР был выбран дебит нефти по скважине после ремонта. Данный критерий выбран по нескольким причинам: невозможность измерения водонефтяного фактора в каждой конкретной скважине, отсутствие конкретной информации по депрессиям при эксплуатации выбранных скважин. В работе описывается определение эффективности ВИР с помощью многофакторного регрессионного анализа. Целью ВИР является устранение причин поступления в скважину воды. Таким образом, произведена оценка обводненности продукции после ремонта. Дебит нефти коррелирует с успешностью проведения ремонта.

На основании проведенного анализа различных источников литературы, а также промыслового опыта установлено, что по каждой технологии получение максимального технологического эффекта укладывается в довольно узкий интервал геолого-физических характеристик пластов. Неправильный выбор технологии не только снижает технологическую эффективность обработки, но и иногда приводит к получению отрицательных результатов, которые часто носят необратимый характер и для своего устранения требуют больших материальных затрат. Поэтому правильный выбор технологии воздействия для конкретного объекта является основным этапом работ при применении методов воздействия на пласт и увеличения добычи нефти [10–17].

Несмотря на большое количество факторов, влияющих на эффективность изоляционных работ, все их можно разбить на две большие группы:

1. Первая группа – природные факторы геолого-физического характера, связанные с объектом воздействия. К ним относятся неконтролируемые параметры: проницаемость ПЗП и УЗП, состояние ПЗП, пластовое давление, вязкость нефти, минерализация пластовых вод.

2. Вторая группа – это технологические параметры, которые определяют режимы проведения работ (технологию). К ним относятся применяемые материалы, состав и рецептура, давление и объем закачки системы.

С целью оценки влияния параметров на эффективность мероприятия проведен статистический анализ с использованием t -критерия Стьюдента, критериев Фишера и Спирмена. По результатам проведенного анализа установлено, что результат отключения водопроявляющих интервалов продуктивного пласта зависит от различных по значимости неуправляемых (геологических) и управляемых (технологических) факторов (таблица). Их многообразие обуславливает стохастическую природу успешного исхода данной операции.

Статистический анализ влияния параметров
на эффективность мероприятия

Параметр	Уровень значимости		
	по Стьюденту	по Фишеру	по Спирмену
Пористость	н/з	н/з	н/з
Состояние ПЗП (скин-фактор, d)	н/з	н/з	н/з
Проницаемость УЗП	н/з	н/з	н/з
Проницаемость ПЗП	з	з	з
Нефтенасыщенность	н/з	н/з	н/з
Песчанистость	н/з	з	з
Расчлененность	н/з	з	з
Нефтенасыщенная толщина	з	з	з
Пластовое давление	з	з	з
Минерализация пластовой воды	з	з	з
Удельный расход состава	з	з	з
Давление закачки состава	з	з	з

*Примечание: з – статистически значимая величина, т.е. оказывает прямое влияние на эффективность; н/з – статистически незначимая величина, т.е. не оказывает значительного влияния на эффективность.

В регрессионном анализе использовалось 16 факторов. Каждый из них по-разному влияет на анализируемые величины (обводненность и дебит нефти после ВИР). Для наглядности построена гистограмма (рис. 1), на которой видна степень влияния того или иного фактора и направление этого влияния (минус – отрицательное, плюс – положительное).

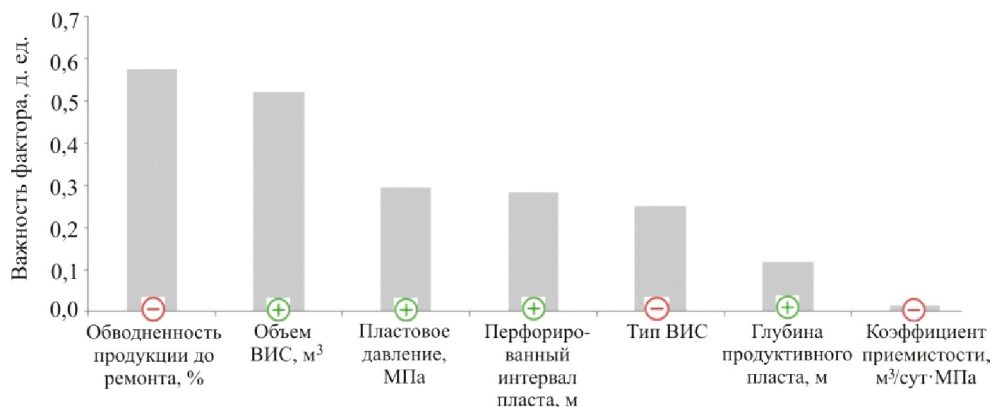


Рис. 1. Степень влияния факторов на дебит нефти после мероприятия на основании проведенного регрессионного анализа

Относительная важность переменной оценивалась по величине вклада отдельного фактора в общую объясняемую моделью долю дисперсии. Из анализа результатов проведенных расчетов следует, что на эффективность

проведения ВИР одни факторы влияют положительно, а другие – отрицательно. Изучение наиболее значимых из них (т.е. вошедших в математическую модель) показало следующее. Наибольшее влияние на эффективность проведения ВИР оказывают такие технологические параметры, как обводненность продукции до ремонта и объем закачиваемого водоизоляционного состава. Ниже рассмотрены геологические и технологические факторы и их влияние на эффективность проведения ВИР.

Обводненность продукции до ремонта. Рассматривая обводненность продукции, можно отметить, что ее повышенные значения отрицательно влияют на эффект мероприятия.

Объем водоизоляционного состава. Из анализа эффективности ВИР с применением составов следовало, что в малоэффективных случаях, в основном, не происходило полной изоляции высокообводненных пропластков: это можно объяснить недостаточным количеством водоизолирующего реагента, закачанного в пласт: об этом свидетельствует и положительное влияние объема продавленной смеси в зону притока воды.

Тип водоизоляционного раствора. Рекомендуется тщательно подбирать водоизоляционный состав. В случае неправильного выбора технологии возможно не только снижение технологической эффективности обработки, но и получение отрицательных результатов, что в дальнейшем потребует значительных материальных затрат.

Пластовое давление. Чем выше пластовое давление, тем выше депрессия, которая непосредственно влияет на условия притока газа к забою и дебит скважины.

Перфорированный интервал пласта (интервал закачки ВИС). Увеличение данного параметра способствует получению лучших результатов после проведения изоляционных работ. Данный фактор можно объяснить тем, что проникновение состава происходит по всей толще перфорированного пласта и, соответственно, кольматация осуществляется более равномерно.

Глубина залегания пласта. Этот фактор коррелирует с пластовым давлением, которое повышается с ростом глубины.

Приемистость пласта. Достаточно информативным фактором по результатам расчета является и приемистость изолируемого пласта, которая оказывает негативное действие на получение высокого дебита нефти в после-ремонтный период. Для повышения эффективности ВИР не следует допускать загрязнения призабойной зоны пласта.

По итогам множественной регрессии отобраны факторы, являющиеся статистически значимыми для модели по значению критерия Стьюдента. Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$Q_{\text{послеГТМ}} = 5,8433 + \frac{3,0390}{\text{тип ВИС}} + 0,0398 \cdot \left(\frac{V_{\text{ВИС}}}{10}\right)^2 + \frac{5,0686}{K_{\text{прием}}} + 0,1218 \cdot \left(\frac{P_{\text{пл}}}{10}\right)^2 +$$

$$+ 0,1990 \cdot \left(\frac{H_{\text{пл}}}{1000}\right)^5 - 6,1307 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{W_{\text{доГТМ}}}{10}\right) - \frac{7,3437}{h_{\text{перф}}} \quad (R^2 = 0,8187),$$

$$W_{\text{послеГТМ}} = 115,06 + 13,60 \cdot 10^{\text{типВИС}} - 3,27 \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{ВИС}}}{10}\right) - 37,93 \cdot \ln\left(\frac{P_{\text{пл}}}{10}\right) -$$

$$- 0,86 \cdot \left(\frac{H_{\text{пл}}}{1000}\right)^5 - 0,25 \cdot V_{\text{цем}}^2 + 7,27 \cdot \rho_{\text{в}}^5 - \frac{438,3}{Q_{\text{ж,доГТМ}}} - 2,47 \cdot Q_{\text{н,доГТМ}} \quad (R^2 = 0,7706),$$

где $V_{\text{ВИС}}$ – объем закачиваемого водоизоляционного состава, м^3 ; тип ВИС – состав для проведения ВИР; $K_{\text{прием}}$ – коэффициент приемистости пласта, $\text{м}^3/(\text{сут} \cdot \text{МПа})$; $P_{\text{пл}}$ – пластовое давление, МПа; $H_{\text{пл}}$ – глубина продуктивного пласта, м; $Q_{\text{ж,доГТМ}}$ – дебит жидкости до ремонта, $\text{м}^3/\text{сут}$; $Q_{\text{н,доГТМ}}$ – дебит нефти до ремонта, т/сут; $W_{\text{доГТМ}}$ – обводненность до ремонта, %; $h_{\text{перф}}$ – перфорированный интервал пласта, м; $V_{\text{цем}}$ – объем цементного состава для закрепления ВИС, м^3 ; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Поскольку для выбранного процесса моделирования недопустима большая ширина доверительного интервала (определяется дебит и обводненность после проведения ВИР), целесообразно принять стандартное значение значимости (уровня надежности модели) $\gamma = 95\%$. Доверительная вероятность в полученной модели не превышает 0,05, следовательно, все коэффициенты являются значимыми на выбранном уровне надежности.

На рис. 2 представлено сопоставление дебитов нефти фактических и полученных согласно модели. На основании данной диаграммы установлено, что более 60 % значений выборки входит в выбранный доверительный интервал, разброс значений относительно предсказанных минимален. В целом при регрессионном анализе величина достоверности, отклонение прогнозируемого дебита нефти от фактического составила не более 10 % как в меньшую, так и в большую сторону. Данные погрешности обусловлены недостаточным объемом выборок и факторов, влияющих на результат ремонта.

Для проверки адаптации разработанной математической модели проведено сопоставление расчетов с гидродинамической моделью месторождения. Согласно проведенному расчету в гидродинамическом симуляторе Tempest MORE дебит нефти после мероприятия составит 4,5 т/сут (прирост 2,0 т/сут) при обводненности 81,3 %. На основании расчета дебита нефти и обводненности после проведения ГТМ на разработанной математической модели получены значения, равные 4,7 т/сут и 86,8 % соответственно. Таким

образом, сопоставление расчетов моделей показало отклонение 10 %. Данные погрешности обусловлены недостаточным объемом выборок и факторов, влияющих на результат ремонта.

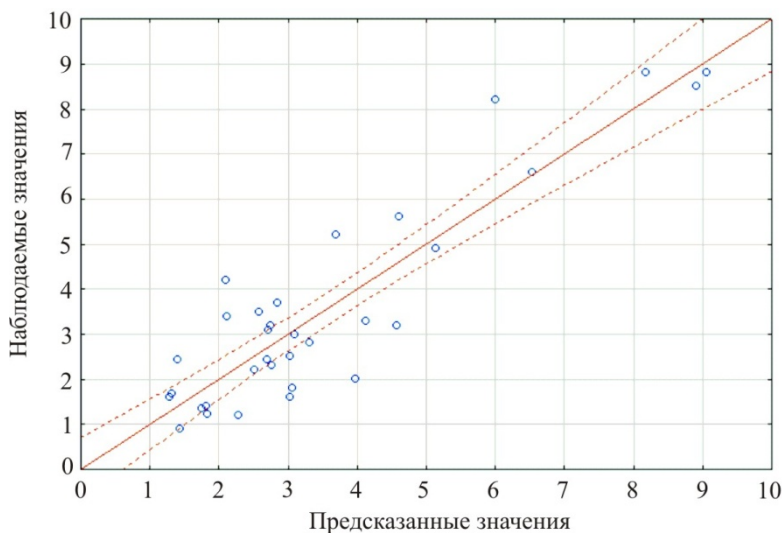


Рис. 2. Сопоставление предсказанных и наблюдаемых значений дебита нефти после ГТМ, т/сут. Доверительный интервал 0,95

Полученные уравнения регрессии сведены в единый файл, позволяющий провести первичную оперативную оценку планируемого мероприятия по водоизоляции. Окно для ввода параметров в программном продукте представлено на рис. 3.

Расчет оценки эффективности на каждой скважине со всеми геолого-технологическими параметрами проведения ремонта сохраняется на отдельном листе, в котором можно провести сортировку скважин по каждому из параметров от максимального к минимальному и наоборот.

При использовании полученной математической модели вместо скважин, в которых ремонт закончился безуспешно, целесообразно было выбрать другие скважины-кандидаты. Созданная математическая модель на практике позволяет повысить эффективность ВИР за счет более корректного подбора скважин-кандидатов, что в итоге приводит к снижению затрат на ремонтные работы. Так, в результате проведения водоизоляционных работ в 2014 г. на обводнившемся эксплуатационном фонде был получен отрицательный результат в 6 скважинах. Некупившиеся расходы составили 9,9 млн руб при средней стоимости проведения ВИР на объектах ООО «Лукойл-Пермь» 1,65 млн руб согласно проектно-технической документации.

№ п/п	Параметр	Значение
0	Скважина №	467
1	Дебит жидкости до ремонта, м ³ /сут	104,4
2	Дебит нефти до ремонта, т/сут	2,5
3	Обводненность до ремонта, %	97,1
4	Тип ВИС	DSGA
5	Объем ВИС, м ³	50
6	Объем цементного состава, м ³	1
7	Коэффициент приемистости, м ³ /(сут·МПа)	12
8	Пластовое давление, МПа	13,7
9	Глубина продуктивного пласта, м	1632
10	Плотность воды, г/см ³	1,1
11	Перфорированный интервал пласта, м	11,2
12	Дебит жидкости после ремонта, м ³ /сут	35,77
13	Дебит нефти после ремонта, т/сут	4,70
14	Обводненность после ремонта, %	86,87
15	Рентабельность	5,31
16	Срок окупаемости, сут	69
Условные обозначения		
Параметры для редактирования		
Рассчитываемые параметры		
<u>Провести оценку эффективности</u>		

Рис. 3. Скриншот программы: окно ввода исходных параметров

Заключение. Разработанная методика выбора скважин-кандидатов для проведения ВИР с использованием многофакторного регрессионного анализа на примере визейского объекта месторождения Пермского края может быть внедрена в качестве программного комплекса с автоматизированным процессом обработки данных. Рассмотренная методика позволяет:

1. Выявлять наиболее значимые факторы, направление и степень их влияния на эффективность проведения ВИР.
2. Оперативно прогнозировать эффективность проведения ВИР в скважинах.
3. Составлять рейтинг скважин-кандидатов для ВИР в порядке убывания прогнозируемой эффективности работ.
4. Повысить успешность проведения ВИР.

Модель построена на примере визейского объекта месторождения Пермского края, однако возможно ее дальнейшее тиражирование на объекты-аналоги месторождений ООО «Лукойл-Пермь». Также по указанной методике могут быть построены аналогичные математические модели для месторождений, имеющих отличные от рассматриваемого геолого-физические характеристики. Следует отметить, что при регрессионном анализе величина достоверности, отклонение прогнозируемого дебита нефти от фактического,

составила не более 10 % как в меньшую, так и в большую сторону. Сопоставление расчетов на гидродинамической модели месторождения и разработанной математической модели показало отклонение 10 %. Для более точного прогнозирования и определения эффективности ВИР на месторождениях ООО «Лукойл-Пермь» необходим значительно больший объем промысловой информации о режимах работы скважин в послеремонтный период, а также о ремонтах, которые будут проведены в последующие годы.

Список литературы

1. Водоизоляционные работы в условиях конусообразования / Т.Р. Балдина, А.В. Распопов, А.С. Казанцев, С.А. Кондратьев, И.В. Аверина, М.С. Бадлюк, С.Н. Глазырин // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 118–120.
2. Анализ мирового опыта применения тампонажных материалов при ремонтно-изоляционных работах / В.А. Стрижнев, А.В. Корнилов, В.И. Никишов, В.Г. Уметбаев // Нефтепромысловое дело. – 2008. – № 4. – С. 28–34.
3. Газизов А.Ш., Газизов А.А. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений на основе ограничения движения вод в пластах. – М.: Недра, 1999. – 285 с.
4. Опыт и перспективы применения технологий ограничения водопритока на месторождениях Пермского края / А.В. Распопов, А.С. Казанцев, Д.В. Андреев, И.В. Аверина, Д.Д. Сидоренко, С.Н. Глазырин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 9. – С. 41–45.
5. Лымарь И.В. Обзор новых технологий изоляции водопритока, внедренных на нефтяных месторождениях Республики Беларусь // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 5. – С. 122–132.
6. Исследование влияние температуры на период гелеобразования и прочность водоизолирующего состава на основе карбоксиметилцеллюлозы / А.М. Шагиахметов, Д.С. Тананыхин, Д.А. Мартюшев, А.В. Лекомцев // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 7. – С. 96–99.
7. Laboratory investigation on performance of cement using different additives schemes to improve early age compressive strength / M.T. Shuker, K.R. Memon, S.Q. Tunio, M.Kh. Memon // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 11, iss. 7. – P. 2298–2305.
8. Saleh Al-Yami A., Ramasamy J., Wagle V. Chemical additives for oil well cementing // Research & Reviews: journal of chemistry. – 2017. – Vol. 6, iss. 4. – P. 1–14.
9. Построение технологии по отключению обводненных интервалов продуктивного пласта / В.А. Стрижнев, С.А. Вежнин, О.Т. Мусин, Т.Э. Нигматуллин // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 1. – С. 8–11.
10. Выбор технологии РИР по отключению верхних и промежуточных пластов / В.А. Стрижнев, А.Ю. Пресняков, О.А. Тяпов, В.Г. Уметбаев // Нефтепромысловое дело. – 2009. – № 7. – С. 42–45.

11. Повышение эффективности применения технологии по ограничению водопритока на основании геолого-физических характеристик пластов (на примере месторождений Пермского края) / Р.А. Дерендяев, Л.А. Захаров, Д.А. Мартюшев, К.А. Дерендяев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 9. – С. 154–163.

12. Мартюшев Д.А., Илюшин П.Ю. Экспресс-оценка взаимодействия между добывающими и нагнетательными скважинами на турне-фаменской залежи Озерного месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 18. – С. 33–41.

13. Клещенко И.И., Зозуля Г.П., Ягафаров А.К. Теория и практика ремонтно-изоляционных работ в нефтяных и газовых скважинах: учеб. пособие. – Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. нефтегаз. ун-та, 2010. – 344 с.

14. Development and thermal performance verification of composite insulation boards containing foam-encapsulated vacuum insulation panels / K. Biswas, A. Desjarlais, D. Smith, J. Letts, T. Jiang // Applied Energy. – 2018. – Vol. 228. – P. 1159–1172.

15. Chromium uptake by lettuce as affected by the application of organic matter and Cr(VI)-irrigation water: Implications to the land use and water management / S. Raptis, D. Gasparatos, M. Economou-Eliopoulos, A. Petridis // Chemosphere. – 2018. – Vol. 210. – P. 597–606.

16. Мартюшев Д.А. Определение рационального забойного давления добывающих скважин при разработке карбонатных коллекторов // Бурение и нефть. – 2014. – № 11. – С. 22–24.

17. Мартюшев Д.А., Мордвинов В.А. Особенности разработки сложно-построенной залежи нефти в условиях трещиновато-порового коллектора // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 22–24.

Получено 9.09.2019

Дерендяев Роман Алексеевич – магистрант кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, инженер ООО «Лукойл-Пермь», e-mail: omgwood19@gmail.com.

Дерендяев Константин Алексеевич – студент, горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: k.derendyaev@yandex.ru.

Научный руководитель – Мартюшев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: martyushevd@inbox.ru.