

УДК 622

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2022

**Методический подход к выбору скважин-кандидатов для ограничения водопритока, рассмотренный на примере Возейского месторождения Республики Коми**Д.А. Кудряшова¹, А.В. Распов^{1,2}¹Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми (Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а)²Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)**A methodical approach to the selection of candidate wells for limiting water inflow, considered on the example of the Vozeyskoye field in the Komi Republic**

Daria A. Kudryashova, Aleksei V. Raspopov

¹PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering LLC in Perm (3a Permskaya st., Perm, 614015, Russian Federation)²Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 30.05.2022. Принята / Accepted: 18.11.2022. Опубликовано / Published: 23.12.2022

Ключевые слова:

месторождение, залежь, обводненность, остаточные подвижные запасы, ограничение водопритока, скважины-кандидаты, геолого-технологические параметры, *t*-критерий Стьюдента, дискриминантный анализ, апостериорная вероятность, источник обводнения, гидродинамическая связь, трассерные исследования, коэффициент корреляции Спирмена, скорость движения индикатора.

Keywords:

field, deposit, water cut, residual mobile reserves, water inflow limitation, candidate wells, geological and technological parameters, Student's *t*-test, discriminant analysis, posterior probability, water cut source, hydrodynamic connection, tracer studies, Spearman correlation coefficient, velocity indicator movement.

Представлен методический подход к выбору скважин-кандидатов для мероприятий по ограничению водопритока, рассмотренный на примере карбониферной залежи Возейского месторождения Республики Коми.

Для определения перечня параметров, оказывающих влияние на эффективность мероприятий по ограничению водопритока, проведена оценка при помощи *t*-критерия Стьюдента: проанализированы средние значения геолого-технологических параметров для классов эффективных и неэффективных мероприятий, полученных по промысловым данным. Среди анализируемых параметров статистически значимыми являются значения проницаемости, пористости, песчанности, толщины интервала водопритока, определенные по результатам потокометрических исследований, текущее пластовое давление и дебит жидкости до проведения мероприятий на скважине.

С помощью дискриминантного анализа осуществлено отнесение скважин-кандидатов карбониферной залежи Возейского месторождения к группам эффективных или неэффективных работ по совокупности статистически значимых геолого-технологических параметров.

Определены три скважины Возейского месторождения для проведения опытно-промышленных работ по ограничению водопритока, которые относятся к области с достаточным количеством остаточных извлекаемых запасов.

С целью исключения неблагоприятных условий применения технологий ограничения водопритока определены источники обводнения скважин-кандидатов. Для повышения успешности мероприятий необходимо исключить из рассмотрения скважины, поступление избыточной воды в которых происходит по трещинам и разломам. С этой целью расчетом коэффициентов корреляции Спирмена установлено, что гидродинамическая связь между тремя скважинами-кандидатами и влияющей на них нагнетательной скважиной характеризуется как слабая, умеренная и средняя, что исключает поступление избыточной воды по трещинам.

A methodical approach to the selection of candidate wells for measures to limit water inflow is presented, considered on the example of the Carboniferous deposit of the Vozeyskoye field in the Komi Republic.

To determine the list of parameters that affect the effectiveness of measures to limit water inflow, an assessment was carried out using the Student's *t*-criterion: the average values of geological and technological parameters for classes of effective and inefficient measures obtained from field data were analyzed. Among the analyzed parameters, the statistically significant values were the values of permeability, porosity, net-to-gross ratio, thickness of the water inflow interval, determined by the results of flow metric studies, current reservoir pressure and fluid flow rate before well interventions.

With the help of discriminant analysis, candidate wells of the Carboniferous deposit of the Vozeyskoye field were assigned to the groups of effective or inefficient operations based on a set of statistically significant geological and technological parameters.

Three wells of the Vozeyskoye field have been identified for pilot work to limit water inflow, which belong to an area with a sufficient amount of residual recoverable reserves.

In order to exclude unfavorable conditions for the use of water inflow limitation technologies, sources of flooding in candidate wells were identified. To increase the measures success, it is necessary to exclude from consideration wells, in which excess water flows through cracks and faults. To this end, by calculating the Spearman correlation coefficients, it was found that the hydrodynamic connection between the three candidate wells and the injection well affecting them is characterized as weak, moderate and medium, which excludes the flow of excess water through fractures.

© Кудряшова Дарья Анатольевна – ведущий инженер (тел.: +007 (982) 453 40 48, e-mail: kudryashovada@mail.ru).

© Распов Алексей Владимирович – кандидат технических наук, менеджер проектов, доцент кафедры «Нефтегазовый инжиниринг» (тел.: +007 (912) 981 86 88, e-mail: aleksej.raspov@pnn.lukoil.com, raspov.aleksey.v@gmail.com).

© Daria A. Kudryashova (Author ID in Scopus: 56979340400) – Lead Engineer (tel.: +007 (982) 453 40 48, e-mail: kudryashovada@mail.ru).

© Aleksei V. Raspopov (Author ID in Scopus: 30267829600) – PhD in Engineering, Project Manager, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Engineering (tel.: +007 (912) 981 86 88, e-mail: aleksej.raspov@pnn.lukoil.com, raspov.aleksey.v@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кудряшова Д.А., Распов А.В. Методический подход к выбору скважин-кандидатов для ограничения водопритока, рассмотренный на примере Возейского месторождения Республики Коми // Недропользование. – 2022. – Т.22, №4. – С.178–184. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.4.5

Please cite this article in English as:

Kudryashova D.A., Raspopov A.V. A methodical approach to the selection of candidate wells for limiting water inflow, considered on the example of the Vozeyskoye field in the Komi Republic. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.4, pp.178-184. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.4.5

Введение

Эксплуатация нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений Республики Коми на текущий момент сопровождается высокими объемами попутно добываемой воды. Одним из решений, направленных на снижение обводненности продукции добывающих скважин, является внедрение технологий ограничения водопритока (ОВП) [1].

Каменноугольная залежь Возейского месторождения является приоритетным объектом для планирования мероприятий по ограничению водопритока, поскольку характеризуется значительным количеством высокообводненных добывающих скважин. При выборе скважин-кандидатов для мероприятий по ограничению водопритока необходимо придерживаться условий получения максимального технологического и экономического эффекта с учетом имеющегося опыта проведения аналогичных работ по снижению обводненности продукции скважин [2].

Различные схемы и алгоритмы выбора скважин-кандидатов для работ по ограничению водопритока показаны в исследовательских работах [3–10]. Данные методики нашли применение на некоторых месторождениях Российской Федерации, однако недостаточная эффективность проведения мероприятий по ограничению водопритока на месторождениях Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции свидетельствует о необходимости дальнейшего развития методик подбора скважин-кандидатов, которые позволяли бы учитывать большее количество геолого-технологических параметров [5, 8].

Разработка методического подхода по выбору скважин-кандидатов с использованием статистических методов

Для подбора скважин-кандидатов на рассматриваемых месторождениях требуется разработка соответствующего методического подхода, способного установить перечень параметров, оказывающих влияние на эффективность мероприятий по ограничению водопритока с учетом локальных особенностей.

Схема выбора скважин-кандидатов для проведения мероприятий по ограничению водопритока представлена на рис. 1.

С целью всестороннего изучения влияния геолого-физических параметров на результаты ОВП рассмотрены 47 аналогичных мероприятий, проведенные на месторождениях Республики Коми различными водоизоляционными составами.

Первый этап методического подхода

Все мероприятия согласно полученным результатам разделены на две группы:

- 1) группа 1 – эффективные мероприятия;
- 2) группа 2 – неэффективные мероприятия.

К эффективным относятся мероприятия по ограничению водопритока, после проведения которых на скважине наблюдается снижение дебита жидкости, а прирост дебита нефти больше или равен нулю. Остальные мероприятия отнесены к неэффективным.

Из выборки геолого-технологических параметров, проанализированы характеризующие геологический разрез исследуемых скважин, свойства добываемых флюидов, конструктивные особенности и эксплуатацию скважины. Таким образом, для анализа выбраны независимые переменные: толщина интервала водопритока, определенная по результатам потокометрических исследований, значения проницаемости, пористости, расчлененности, песчаности, эффективная нефтенасыщенная толщина, текущее пластовое давление, температура пласта, расстояние от нижнего перфорационного отверстия до водонефтяного контакта (ВНК),

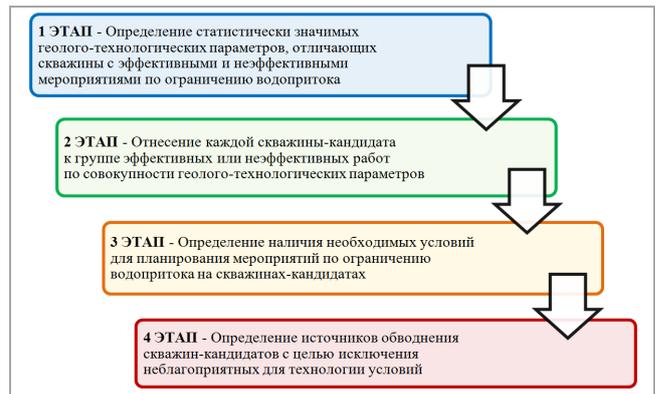


Рис. 1. Схема методического подхода по выбору скважин-кандидатов

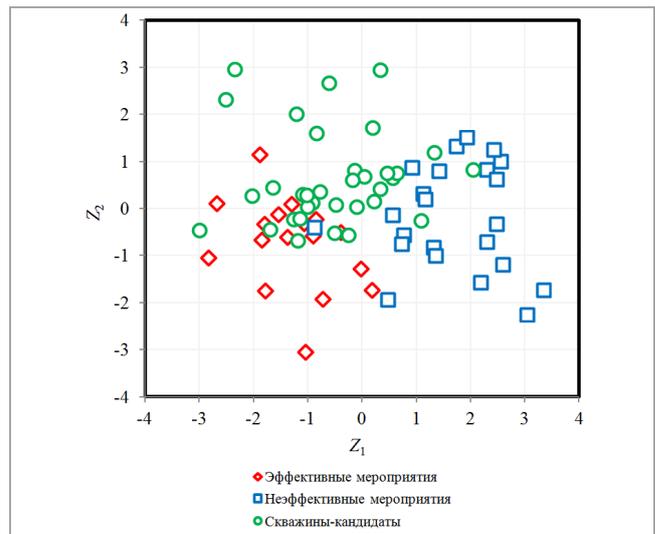


Рис. 2. Диаграмма рассеяния канонических значений для пар значений дискриминантных функций 1 и 2

текущие плотность и минерализация попутно добываемой воды, вязкость нефти, дебиты нефти, жидкости и обводненность до проведения мероприятия по ОВП.

Для определения перечня параметров, оказывающих влияние на эффективность мероприятий по ОВП, проведена оценка при помощи *t*-критерия Стьюдента [11–13]: проанализированы средние значения геолого-технологических параметров для классов эффективных и неэффективных мероприятий, полученных по смысловым данным (табл. 1).

Среди анализируемых параметров статистически значимыми являются значения толщины интервала водопритока, проницаемости, пористости и песчаности, текущее пластовое давление, дебит жидкости до проведения мероприятия по ограничению водопритока.

Второй этап методического подхода

В ходе второго этапа предлагаемого методического подхода после определения перечня параметров, оказывающих влияние на эффективность мероприятий по ОВП, для дальнейшего выбора скважин-кандидатов в данной работе предлагается использование дискриминантного анализа. Дискриминантный анализ является одним из наиболее широко используемых в статистике многомерных методов и также находит применение в геологических науках [14–23].

Для определения скважин-кандидатов проведением дискриминантного анализа, помимо группы 1 – эффективные мероприятия, и группы 2 – неэффективные мероприятия, выделена группа скважин-кандидатов

Таблица 1

Значения *t*-критерия Стьюдента для геолого-технологических параметров

Параметр	Среднее		Значение критерия Стьюдента / Уровень значимости	Количество наблюдений		Стандартное отклонение	
	группа 1	группа 2		группа 1	группа 2	группа 1	группа 2
Толщина интервала водопритока, м	9,2	14,4	$\frac{2,13}{0,04}$	14	26	4,1	8,6
Проницаемость, мД	291,8	76,2	$\frac{-2,06}{0,04}$	18	25	518,3	78,8
Пористость, %	17,7	15,3	$\frac{-2,03}{0,04}$	17	28	3,1	4,1
Расчлененность, ед.	13,5	17,3	$\frac{1,10}{0,28}$	17	27	6,9	12,9
Песчанность, доли ед.	0,49	0,38	$\frac{-3,02}{0,03}$	17	27	0,1	0,1
Эффективная нефтенасыщенная толщина, м	26,9	29,7	$\frac{0,51}{0,61}$	17	26	16,4	18,1
Текущее пластовое давление, МПа	16,0	21,9	$\frac{2,27}{0,03}$	18	27	7,6	9,3
Температура, °С	52,6	63,3	$\frac{1,46}{0,15}$	19	28	22,8	26,2
Текущая плотность попутно добываемой воды, г/см ³	1,03	1,03	$\frac{-1,12}{0,27}$	15	16	0,01	0,01
Текущая минерализация попутно добываемой воды, мг/л	40741	45728	$\frac{0,51}{0,61}$	17	27	20654	36597
Вязкость нефти, мПа·с	5,1	3,7	$\frac{-1,00}{0,32}$	17	22	4,5	4,13
Расстояние от нижнего перфорационного отверстий до ВНК, м	32,7	25,8	$\frac{-0,80}{0,43}$	17	18	29,2	22,1
Дебит жидкости до мероприятия, т/сут	174,5	122,6	$\frac{-2,27}{0,02}$	19	28	66,8	83,0
Дебит нефти до мероприятия, т/сут	4,3	5,1	$\frac{0,44}{0,66}$	19	28	3,2	7,2
Обводненность, %	97,3	95,1	$\frac{0,44}{0,66}$	19	28	2,1	5,3

Таблица 2

Итоговая таблица анализа данных дискриминантного анализа

Параметр	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	Толерантность
Толщина интервала водопритока, м	0,38	0,85	0,92
Проницаемость, мД	0,34	0,94	0,94
Пористость, %	0,41	0,79	0,78
Песчанность, доли ед.	0,41	0,80	0,88
Текущее пластовое давление, МПа	0,37	0,88	0,76
Дебит жидкости до мероприятия, т/сут	0,37	0,88	0,88

каменноугольной залежи Возейского месторождения. Таким образом, применение дискриминантного анализа позволит отнести каждую скважину-кандидата к группе эффективных или неэффективных работ по совокупности геолого-технологических параметров, способных оказать влияние на эффективность мероприятий по ОВП, которые определены с помощью *t*-критерия Стьюдента: толщина интервала водопритока, проницаемость, пористость, песчанность, текущее пластовое давление, дебит жидкости до проведения мероприятия.

При проведении дискриминантного анализа получены следующие результаты: значение лямбды Уилкса составляет 0,32; приближенное значение *F*-статистики с числом степеней свободы 12 и 130 составляет 8,2; *p*-уровень значимости *F*-критерия составляет менее 0,00001 (табл. 2).

Для получения дальнейших результатов о дискриминации групп скважин с эффективными, неэффективными мероприятиями и скважин-кандидатов проведен канонический анализ. По данным толщины интервала водопритока, проницаемости, пористости, песчанности, текущего пластового давления, дебита жидкости построены следующие линейные дискриминантные функции:

$$Z_1 \text{ (группа 1)} = -0,076 \cdot H_{\text{ВП}} - 0,004 \cdot K_{\text{пр}} + 5,422 \cdot K_{\text{п}} + 81,197 \cdot K_{\text{песч.}} + 1,43 \cdot P_{\text{пл}} + 0,05 \cdot Q_{\text{ж}} - 89,305;$$

$$Z_2 \text{ (группа 2)} = 0,148 \cdot H_{\text{ВП}} - 0,004 \cdot K_{\text{пр}} + 4,553 \cdot K_{\text{п}} + 62,179 \cdot K_{\text{песч.}} + 1,339 \cdot P_{\text{пл}} + 0,034 \cdot Q_{\text{ж}} - 64,292;$$

где $H_{\text{ВП}}$ – толщина интервала водопритока, определенная по результатам потокометрических исследований, м;

$K_{\text{пр}}$ – значение проницаемости, мкм² $K_{\text{п}}$ – значение пористости, доли ед.; $K_{\text{песч.}}$ – значение песчанности, доли ед.; $P_{\text{пл}}$ – текущее пластовое давление, МПа; $Q_{\text{ж}}$ – дебит жидкости до мероприятия для скважин с ограничением водопритока и текущий дебит жидкости для скважин-кандидатов, т/сут.

По данным функциям вычислены значения Z_1 и Z_2 , которые для различных групп скважин приведены на рис. 2.

Из данных рис. 2 видно, что значения Z_1 и Z_2 достаточно хорошо разделяются в пределах изучаемых групп скважин 1 и 2.

В заключении дискриминантного анализа получена таблица значений апостериорных вероятностей, т.е. принадлежности скважин-кандидатов к одной из двух групп. Выявлено, что из 32 скважин-кандидатов Возейского месторождения 21 скважина относится к группе с эффективными мероприятиями и рекомендуется для дальнейшего изучения (табл. 3).

Третий этап методического подхода

В ходе третьего этапа предлагаемого методического подхода среди выбранных в результате анализа апостериорных вероятностей скважин определены три скважины Возейского месторождения – № Д-1, Д-2, Д-3, находящиеся в очаге нагнетания скважины № Н-1, на которых присутствуют необходимые условия для планирования мероприятий по ограничению водопритока (табл. 4). Данные скважины являются первоочередными кандидатами на проведения опытно-промышленных работ по испытанию технологий ОВП [1].

Таблица 3

Значение апостериорных вероятностей для скважин-кандидатов Возейского месторождения

№ скважины-кандидата	Группа 1 – эффективные мероприятия	Группа 2 – неэффективные мероприятия
406	0,326035	0,673965
556	0,996727	0,003273
1518	0,000000	1,000000
1550	0,513518	0,486482
1576	0,999996	0,000004
1585	0,003120	0,996880
1626	0,971031	0,028969
1638	0,029492	0,970508
1660	0,614557	0,385443
1661	0,000018	0,999982
Д-1	0,968902	0,031098
1679	0,999304	0,000696
Д-2	0,892074	0,107926
1698	0,995537	0,004463
1709	0,311543	0,688457
1712	1,000000	0,000000
1727	0,994948	0,005052
1728	0,531812	0,468188
1731	0,983361	0,016639
1736	0,999697	0,000303
1743	0,002321	0,997679
1746	0,994934	0,005066
Д-3	0,998603	0,001397
1764	0,872952	0,127048
1784	0,476227	0,523773
1837	0,020571	0,979429
1844	0,898820	0,101180
1873	0,123866	0,876134
1879	0,075779	0,924221
1ОЦ	0,999313	0,000687
2ОЦ	1,000000	0,000000
5ОЦ	0,999999	0,000001

Таблица 4

Параметры скважин-кандидатов Возейского месторождения [1]

Геолого-технологические параметры	№ Д-1	№ Д-2	№ Д-3
Категория скважины по фонду	Добывающая	Добывающая	Добывающая
Способ эксплуатации	ЭЦН	ЭЦН	ЭЦН
Объект разработки	С2-3	С2-3	С2-3
Пластовое давление, МПа	12,5	14	15,6
Пластовая температура, °С	37	37	40
Диаметр эксплуатационной колонны, мм	146	146	146
Интервалы перфорации, м	1791–1804,6	1699,8–1707,2	1690–1696 1700,4–1712
Искусственный забой, м	1843	1773,2	1766,3
Текущий забой, м	1815,8	1744,6	1754
Опрессовка эксплуатационной колонны на давление, МПа	13	10	10
Дебит нефти, т/сут	2	1,4	0,82
Дебит жидкости, м³/сут	86	50	97
Обводненность, %	98	91,5	99
Остаточные извлекаемые запасы, тыс. т	38,2	25,8	23,8

Таблица 5

Применение коэффициента корреляции Спирмена для описания значимости гидродинамической связи

Значение коэффициента корреляции Спирмена	Характеристика значимости гидродинамической связи	Предположительное наличие трещин, соединяющих скважины
$R_s < 0,1$	Связь почти не наблюдается	Нет
$0,101 < R_s < 0,3$	Слабая связь	Нет
$0,301 < R_s < 0,5$	Умеренная связь	Нет
$0,501 < R_s < 0,7$	Связь средней значимости	Нет
$0,701 < R_s < 0,9$	Сильная связь	Да
$0,901 < R_s < 1,0$	Очень сильная связь	Да

Четвертый этап методического подхода

Согласно мировому опыту проведения мероприятий по ограничению водопритока [24–28] при обработке трещин, соединяющих добывающие и нагнетательные скважины, присутствует ряд трудноразрешимых проблем. Прежде всего, возникают сложности с определением объема закачки, поскольку размер трещин неизвестен. Кроме того, закачиваемый водоизоляционный состав может закупорить продуктивные трещины, а после закачки велика вероятность выноса состава из пласта. Следовательно, для повышения успешности мероприятий по ограничению водопритока и устранению указанных выше проблем необходимо исключить из рассмотрения скважины, поступление избыточной воды в которых происходит по трещинам и разломам.

Поскольку на каменноугольной залежи Возейского месторождения наблюдается сильная неоднородность по проницаемости матричной и трещинной составляющей, определение источника обводнения скважин-кандидатов с целью исключения неблагоприятных для технологий ограничения водопритока условий является актуальной задачей.

Одним из показателей характера поступления воды в скважины-кандидаты от нагнетательных скважин служит наличие и значимость гидродинамической связи между добывающими и нагнетательными скважинами. Площадные гидродинамические методы: трассерные исследования и гидропрослушивание – считаются наиболее распространенными и информативными методами исследования [29–39]. Однако стоит отметить, что площадные исследования являются дорогостоящими и продолжительными по времени. Это ограничивает применение данного вида исследования для оценки гидродинамической связи между скважинами перед каждыми водоизоляционными работами.

На выбранном опытном участке, включающем в себя добывающие скважины № Д-1, Д-2, Д-3 и нагнетательную скважину № Н-1, площадные гидродинамические исследования не проводились, таким образом, оценку степени гидродинамической связи, способной выявить трещины и разломы между скважинами, предлагается провести с применением соответствующего метода математической статистики – метода ранговой корреляции Спирмена. Метод ранговой корреляции Спирмена позволяет определить наличие и тесноту корреляционной связи между двумя рядами сопоставляемых количественных показателей [40–44]. Для применения данных методов по скважинам-кандидатам помимо ежемесячных данных по добыче привлечены также данные по закачке в нагнетательные скважины.

Для каменноугольной залежи Возейского месторождения расчет коэффициентов корреляции Спирмена осуществлен для 17 очагов нагнетания, включающих в себя 50 пар добывающих и нагнетательных скважин. В данной работе за показатель Y принимается приемистость нагнетательной скважины, м³/сут, за показатель X – дебит жидкости исследуемых скважин-кандидатов, м³/сут, взятые за весь период закачки.

Для выявления возможности использования коэффициентов корреляции Спирмена в качестве инструмента оценки значимости гидродинамической связи между скважинами каменноугольной залежи Возейского месторождения установлена связь между данными коэффициентами и результатами трассерных исследований с помощью корреляционного анализа. С этой целью в первый массив включены результаты расчета коэффициентов корреляции Спирмена для пар исследуемых в очагах скважин, во второй – результаты определения максимальной скорости движения индикатора для аналогичных скважин. Результаты проведения корреляционного анализа представлены на рис. 3.

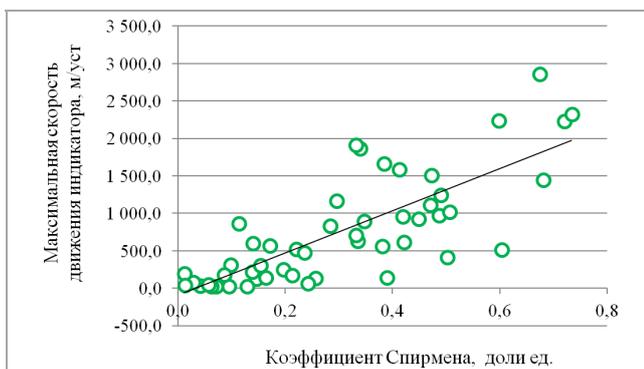


Рис. 3. Результаты проведения корреляционного анализа

Таблица 6

Данные расчета коэффициентов корреляции Спирмена

№ скважины-кандидата	№ нагнетательной скважины	ρ	Характеристика значимости гидродинамической связи
Д-1	Н-1	0,68	Связь средней значимости
Д-2	Н-1	0,31	Умеренная связь
Д-3	Н-1	0,20	Слабая связь

Из рис. 3 видно достаточно высокую корреляционную связь между коэффициентами корреляции Спирмена и значениями максимальной скорости движения индикатора ($R = 0,8$). Поскольку время и скорость движения индикатора при проведении трассерных исследований являются одними из основных параметров, характеризующих наличие и значимость гидродинамической связи, можно сделать вывод, что использование коэффициентов корреляции Спирмена на Возейском месторождении также способно устанавливать связь между скважинами.

Библиографический список

1. Результаты опытно-промышленных работ по ограничению водопритока составом на основе шитых полимерных систем «СПС-ЛС «ПермНИПнефть» / Д.А. Кудряшова [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 3. – С. 53–58.
2. Кудряшова Д.А. Методика подбора скважин-кандидатов для водоизоляционных работ на месторождениях ПАО «ЛУКОЙЛ» // Инженерная практика. – 2019. – № 4. – С. 42–50.
3. Поплыгина И.С. Обоснование проведения потоковыравнивающих и водоизоляционных работ на карбонатных залежах высоковязкой нефти с применением гелеобразующих составов: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2022.
4. Корабельников А.И. Разработка и исследование технологий и технических средств по повышению эффективности ограничения водопритока в добывающих скважинах (на примере Самотлорского месторождения): автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Тюмень, 2005.
5. Габдулов Р.Р., Никишов В.И., Сливка П.И. Обобщение опыта выбора потенциальных скважин-кандидатов и технологий для проведения ремонтно-изоляционных работ // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2009. – № 4. – С. 22–26.
6. Снижение рисков при проведении ремонтно-изоляционных работ / Т.С. Усманов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 8. – С. 11–14.
7. Совершенствование методики выбора скважин-кандидатов для проведения водоизоляционных работ / А.Р. Латыпов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2009. – № 7. – С. 46–50.
8. Куликов А.Н., Никишов В.И. Исследование особенностей обводнения скважин нефтяных залежей различного типа при проведении ГТМ с целью планирования мероприятий по ограничению добычи воды // Интервал. – 2007. – № 8. – С. 27–31.
9. Кудряшова, Д.А. Совершенствование алгоритма подбора скважин-кандидатов для работ по ограничению водопритока с применением методик идентификации источников обводнения // Сборник работ победителей XXI Конкурса на лучшую молодежную научно-техническую разработку по проблемам топливно-энергетического комплекса. – М.: Министерство энергетики Российской Федерации, Общероссийская общественная организация «Национальная система развития научной, творческой и инновационной деятельности молодежи России «Интеграция», 2014. – С. 249–255.
10. Kabir A.H., Bakar M.A. Water / Gas Shutoff Candidates Selection // Paper SPE 54357 presented at the 1999 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta. – Indonesia, 1999.
11. Перцев Н.В. Количественные методы анализа и обработки данных: учеб. пособие. – Омск: Изд-во Омск. гос. ун-та, 2002. – 142 с.
12. Поморский Ю.Л. Методы статистического анализа экспериментальных данных: монография. – Л., 1960. – 174 с.
13. Lehmann E.L. The Fisher, Neyman-Pearson theories of testing hypotheses: one theory or two // American Statistical Association. – 1993. – P. 1242–1249.
14. Михалевич И.М., Примина С.П. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерной информации). – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2006. – 115 с.
15. Кудряшова Д.А. Использование вероятностно-статистических методов для определения источников обводнения скважин-кандидатов для водоизоляционных работ (на примере визейского объекта месторождения Пермского края) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – № 1. – С. 26–36.
16. Миллер Р.Л. Статистический анализ в геологических науках: пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 514 с.
17. Сафин Д.К. Методика вероятностно-статистической оценки коэффициента извлечения нефти из залежей на различных стадиях их изученности // Нефть и газ. – 2001. – № 4. – С. 63–66.
18. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Репина В.А. Исследование процесса нефтеизвлечения в коллекторах различного типа пустотности с использованием многомерного статистического анализа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 19. – С. 145–154.
19. Davis J.C. Statistics and data analysis in geology. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2002. – 656 p.
20. Вистелиус А.В. Основы математической геологии. – Л.: Недра, 1980. – 389 с.
21. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии: в 2 кн. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.
22. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии: в 2 кн. – М.: Недра, 1990. – Кн. 2. – 426 с.
23. Репина В.А. Возможность учета плотности породы при моделировании проницаемости в геолого-гидродинамической модели нефтяных месторождений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 2. – С. 104–112.
24. Диагностика и ограничение водопритока / Б. Бейли [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2001. – № 1. – С. 44–67.
25. Lake L.W. Chemical Flooding. Petroleum Engineers Handbook. – Richardson: SPE, 1992. – P. 783.

В табл. 5 представлены интервалы возможных значений коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, соответствующие характеристики значимости гидродинамической связи между скважинами и предположительное наличие трещин, соединяющих добывающие и нагнетательные скважины. Соответствие значимости гидродинамической связи между скважинами значениям коэффициентов корреляции Спирмена показано в работе [45].

В табл. 6 приведены результаты расчета коэффициента корреляции Спирмена для пар скважин-кандидатов и нагнетательной скважины № Н-1.

В результате расчета коэффициента корреляции Спирмена выявлено, что пара скважин № Д-3 – № Н-1 характеризуется слабой гидродинамической связью, пара скважин № Д-2 – № Н-1 – умеренной гидродинамической связью, пара скважин № Д-1 – № Н-1 – связью средней значимости, что исключает поступление избыточной воды по трещинам, соединяющим нагнетательную и добывающие скважины.

Заключение

На примере каменноугольной залежи Возейского месторождения показан методический подход к выбору скважин-кандидатов, основанный на изучении влияния различных геолого-технологических параметров скважин на эффективность проведения мероприятий по ограничению водопритока. Методический подход состоит из четырех этапов и позволяет осуществлять анализ большого количества скважин-кандидатов, что является особенно актуальным для крупных эксплуатационных объектов и месторождений Республики Коми.

С помощью предлагаемого методического подхода возможно определение источников обводнения скважин с целью исключения неблагоприятных условий для технологий ограничения водопритока.

26. Lane R.H.; Seright, R.S. "Gel Fracture Shutoff in Fractured and Faulted Horizontal Wells". Paper SPE 65527 presented at the 2000 SPE // Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology held in Calgary. – Canada, 2000.
27. Water Control / B. Bailey, J. Elphick, F. Kuchuk, L. Roodhart // Oilfield Review. – 2000. – P. 30–51.
28. Connecting Laboratory and Field Results for Gelant Treatments in Naturally Fractured Production Wells / A. Marin, R. Seright [et al.] // Paper SPE 77411 presented at the SPE Annual Technological Conference held in San Antonio. – Texas, 2002.
29. Cased Hole Log Interpretation (Principles / Applications). Schlumberger. Houston, 1989. – 203 p.
30. Соколовский Э.В. Соловьев Г.Б., Тренчиков Ю.И. Индикаторные методы изучения нефтегазового пласта. – М.: Недра, 1986. – 157 с.
31. Залетова Д.В. Ипатов А.И. Промысловые и геофизические методы изучения межскважинного пространства на месторождениях нефти и газа: учебное пособие. – М.: РГУНГ им. И.М. Губкина, 2003. – 68 с.
32. Ипатов А.И., Залетова Д.В. Причина высоких скоростей фильтрационных потоков при трассировании индикаторами // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2004. – № 10. – С. 57–62.
33. Саулей В.И., Хозяинов М.С., Тренчиков А.Ю. Комплексное исследование гидродинамической связи между добывающими и нагнетательными скважинами индикаторными и геофизическими методами // Каротажник. – 2004. – № 123–124. – С. 96–109.
34. Kamal, M.M. Interference and Pulse Testing-A Review. 10042-PA SPE Journal Paper, 1983.
35. Применение индикаторных исследований на нефтяных месторождениях в терригенных и карбонатных коллекторах / А.Ю. Никитин [и др.] // Каротажник. – 2003. – № 110.
36. Роль новых технологий в системе гидродинамических исследований компании «Сибнефть» / И.Р. Дяшев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 12. – С. 42–45.
37. Kudriashova D.A. Definition of injection well optimum operation for polymer flooding // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности. – 2017. – № 1. – С. 32–36.
38. Ипатов А.И., Кременицкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2005. – 780 с.
39. Уолкотт Д. Разработка и управление месторождениями при заводнении. – М.: ЮКОС / Schlumberger, 2001. – 143 с.
40. Благовещенский Ю.Н. Тайны корреляционных связей в статистике: монография. – М.: Научная книга: ИНФРА-М, 2009. – 158 с.
41. Дородницын В.А. Групповые свойства разностных уравнений. – М.: Физматлит, 2001. – 236 с.
42. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
43. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 628 с.
44. Лагутин М. Б. Наглядная математическая статистика: в 2 т. – М.: П-центр, 2003. – 345 с.
45. 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. – 2016. – № 18. – С. 33–41.

References

1. Kudriashova D.A. et al. Rezultaty opytно-promyshlennyykh работ po ogranicheniiu vodopritoka sostavom na osnove sshitykh polimernyykh sistem "SPS-LS "PermNIPneft" [Results of experimental industrial works on limiting water inflow with a composition based on cross-linked polymer systems "SPS-LS "PermNIPneft"]. *Neftpromyslovoye delo*, 2021, no. 3, pp. 53-58. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-3(627)-53-58
2. Kudriashova D.A. Metodika podbora skvazhin-kandidatov dlia vodoizoliatsionnykh работ na mestorozhdeniakh PAO "LUKOIL" [Methodology for selecting candidate wells for water shut-off works at the fields of PJSC LUKOIL]. *Inzhenernaia praktika*, 2019, no. 4, pp. 42-50.
3. Poplygina I.S. Obosnovanie provedeniia potokovyravniavushchikh i vodoizoliatsionnykh работ na karbonatnykh zalezakh vysokoviazkoi nefi s primeneniem geleobrazuiushchikh sostavov [Substantiation of flow equalization and water isolation works on carbonate deposits of high-viscosity oil using gel-forming compositions]. Ph. D. thesis. Perm', 2022.
4. Korabel'nikov A.I. Razrabotka i issledovanie tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv po povysheniiu effektivnosti ogranicheniia vodopritokov v dobyvaiushchikh skvazhinakh (na primere Samotorskogo mestorozhdeniia) [Development and research of technologies and technical means to improve the efficiency of water inflow limitation in production wells (on the example of the Samotlor field)]. Abstract of Ph. D. thesis. Tiumen', 2005.
5. Gabdulov R.R., Nikishov V.I., Slivka P.I. Obobshchenie opyta vybora potentsial'nykh skvazhin-kandidatov i tekhnologii dlia provedeniia remontno-izoliatsionnykh работ [Best Practice for Selecting Potential Candidate Wells and Methods for Repair and Insulation Works (RIW)]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik OAO "NK "Rosneft"*, 2009, no. 4, pp. 22-26.
6. Usmanov T.S. et al. Snizhenie riskov pri provedenii remontno-izoliatsionnykh работ [Reducing risks during repair and insulation work]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2004, no. 8, pp. 11-14.
7. Latypov A.R. et al. Sovershenstvovanie metodiki vybora skvazhin-kandidatov dlia provedeniia vodoizoliatsionnykh работ [Approaches perfection to the choice of wells for carrying waterproof works]. *Neftegazovoye delo*, 2009, no. 7, pp. 46-50.
8. Kulikov A.N., Nikishov V.I. Issledovanie osobennosti obvodneniia skvazhin nefiannykh zalezhei razlichnogo tipa pri provedenii GTM s tsel'iu planirovaniia meropriiati po ogranicheniiu dobychi vody [Study of the features of watering wells of oil deposits of various types during geological and technical operations in order to plan measures to limit water production]. *Interval*, 2007, no. 8, pp. 27-31.
9. Kudriashova, D.A. Sovershenstvovanie algoritma podbora skvazhin-kandidatov dlia работ po ogranicheniiu vodopritoka s primeneniem metodik identifikatsii istochnikov obvodneniia [Improving the algorithm for selecting candidate wells for work to limit water inflow using methods for identifying water sources]. *Sbornik работ pobediteli XXI Konkursa na luchshiuu molodezhnuiu nauchno-tekhnicheskuiu razrabotku po problemam toplivno-energeticheskogo kompleksa*. Moscow: Ministerstvo energetiki Rossiiskoi Federatsii, Obshcherossiiskaa obshchestvennaia organizatsiia "Natsional'naia sistema razvitiia nauchnoi, tvorcheskoi i innovatsionnoi deiatel'nosti molodezhi Rossii "Integratsiia", 2014, pp. 249-255.
10. Kabir A.H., Bakar M.A. Water/Gas Shutoff Candidates Selection. *Paper SPE 54357 presented at the 1999 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta*. Indonesia, 1999. DOI: 10.2118/54357-MS
11. Pertsev. N.V. Kolichestvennye metody analiza i obrabotki dannykh [Quantitative methods of data analysis and processing]. Omsk: Omskii gosudarstvennyi universitet, 2002, 142 p.
12. Pomorskii Iu.L. Metody statisticheskogo analiza eksperimental'nykh dannykh [Methods of statistical analysis of experimental data]. Leningrad, 1960, 174 p.
13. Lehmann E.L. The Fisher, Neyman-Pearson theories of testing hypotheses: one theory or two. *American Statistical Association*, 1993, pp. 1242-1249. DOI: 10.2307/2291263
14. Mikhalevich I.M., Primina S.P. Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoi informatsii (s ispol'zovaniem komp'iuternoi informatsii) [Application of mathematical methods in the analysis of geological information (using computer information)]. Irkutskii gosudarstvennyi universitet, 2006, 115 p.
15. Kudriashova D.A. Ispol'zovanie veroiatnostno-statisticheskikh metodov dlia opredeleniia istochnikov obvodneniia skvazhin-kandidatov dlia vodoizoliatsionnykh работ (na primere vizeiskogo ob'ekta mestorozhdeniia Permskogo kraia) [Use of probabilistic and statistical methods for determination of the sources of water flow in candidate wells for water shut-off works (on example of the Visean reservoir of the Perm region field)]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoe delo*, 2018, no. 1, pp. 26-36. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.3
16. Miller R.L. Statisticheskii analiz v geologicheskikh naukakh [Statistical Analysis in Geological Sciences]. Moscow: Mir, 1965, 514 p.
17. Safin D.K. Metodika veroiatnostno-statisticheskoi otsenki koeffitsienta izvlecheniia nefi iz zalezhei na razlichnykh stadiakh ikh izuchennosti [Method of probabilistic-statistical estimation of oil recovery factor from deposits at various stages of their exploration]. *Neft' i gaz*, 2001, no. 4, pp. 63-66.
18. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Repina V.A. Issledovanie protsessa nefteizvlecheniia v kollektorakh razlichnogo tipa pustotnosti s ispol'zovaniem mnogomernogo statisticheskogo analiza [Study of oil recovery from reservoirs of different void types with use of multidimensional statistical analysis]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoe delo*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 145-154. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.5
19. Davis J.C. Statistics and data analysis in geology. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2002, 656 p.
20. Vistelius A.V. Osnovy matematicheskoi geologii [Fundamentals of mathematical geology]. Leningrad: Nedra, 1980, 389 p.
21. Devis Dzh.S. Statisticheskii analiz dannykh v geologii [Statistical data analysis in geology]. Moscow: Nedra, 1990, book 1, 319 p.
22. Devis Dzh.S. Statisticheskii analiz dannykh v geologii [Statistical data analysis in geology]. Moscow: Nedra, 1990, book 2, 426 p.
23. Repina V.A. Vozmozhnost' ucheta plotnosti porody pri modelirovanii pronitsaemosti v geologo-gidrodinamicheskoi modeli nefiannykh mestorozhdenii [How to consider rock density in fluid flow model of oil fields during permeability modelling]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoe delo*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 104-112. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.2.1
24. Beili B. et al. Diagnostika i ogranichenie vodopritokov [Diagnostics and limitation of water inflows]. *Neftegazovoye obozrenie*, 2001, no. 1, pp. 44-67.
25. Lake L.W. Chemical Flooding. Petroleum Engineers Handbook. Richardson: SPE, 1992, 783 p.
26. Lane R.H., Seright R.S. "Gel Fracture Shutoff in Fractured and Faulted Horizontal Wells". Paper SPE 65527 presented at the 2000 SPE. *Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology held in Calgary*. Canada, 2000. DOI: 10.2118/65527-MS
27. Bailey B., Elphick J., Kuchuk F., Roodhart L. Water Control. *Oilfield Review*, 2000, pp. 30-51.
28. Marin A., Seright R. et al. Connecting Laboratory and Field Results for Gelant Treatments in Naturally Fractured Production Wells. *Paper SPE 77411 presented at the SPE Annual Technological Conference held in San Antonio*. Texas, 2002. DOI: 10.2118/77411-MS
29. Cased Hole Log Interpretation (Principles/Applications). Schlumberger. Houston, 1989, 203 p.
30. Sokolovskii E.V. Solov'ev G.B., Trenchikov Iu.I. Indikatornye metody izucheniia neftegazovogo plasta [Indicator methods for studying an oil and gas reservoir]. Moscow: Nedra, 1986, 157 p.

31. Zaletova D.V. Ipatov A.I. Promyslovye i geofizicheskie metody izucheniia mezhskvazhinno prostranstva na mestorozhdeniakh nefti i gaza [Field and geophysical methods for studying the interwell space in oil and gas fields]. Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2003, 68 p.
32. Ipatov A.I., Zaletova D.V. Prichina vysokikh skorostei fil'tratsionnykh potokov pri trassirovanii indikatorami [The reason for the high velocities of filtration flows when tracing indicators]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2004, no. 10, pp. 57-62.
33. Saulei V.I., Khoziainov M.S., Trenchikov A.Iu. Kompleksnoe issledovanie gidrodinamicheskoi svyazi mezhdru dobyvaiushchimi i nagnetatel'nymi skvazhinami indikatornymi i geofizicheskimi metodami [Comprehensive study of the hydrodynamic connection between production and injection wells using indicator and geophysical methods]. *Karotazhnik*, 2004, no. 123-124, pp. 96-109.
34. Kamal, M.M. Interference and Pulse Testing-A Review. *10042-PA SPE Journal Paper*, 1983. DOI: 10.2118/10042-PA
35. Nikitin A.Iu. et al. Primenenie indikatornykh issledovaniia na neftiannykh mestorozhdeniakh v terrigenykh i karbonatnykh kollektorakh [Application of indicator studies in oil fields in terrigenous and carbonate reservoirs]. *Karotazhnik*, 2003, no. 110.
36. Diiashev I.R. et al. Rol' novykh tekhnologii v sisteme gidrodinamicheskikh issledovaniia kompanii "Sibneft" [The role of new technologies in the system of hydrodynamic studies of the Sibneft company]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2003, no. 12, pp. 42-45.
37. Kudriashova D.A. Definition of injection well optimum operation for polymer flooding. *Innovatsionnye protsessy v issledovatel'skoi i obrazovatel'noi deiatel'nosti*, 2017, no. 1, pp. 32-36.
38. Ipatov A.I., Kremenetskii M.I. Geofizicheskii i gidrodinamicheskii kontrol' razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov [Geophysical and hydrodynamic control of the development of hydrocarbon deposits]. Moscow: Nauchno-izdatel'skii tsentr "Reguliarnaia i khaoticheskaia dinamika"; Institut komp'iuternykh issledovaniia, 2005, 780 p.
39. Uolkott D. Razrabotka i upravlenie mestorozhdeniiami pri zavodnenii [Development and management of fields during waterflooding]. Moscow: IuKOS / Schlumberger, 2001, 143 p.
40. Blagoveshchenskii Iu.N. Tainy korreliatsionnykh svyazei v statistike [Secrets of correlations in statistics]. Moscow: Nauchnaia kniga: INFRA-m, 2009, 158 p.
41. Dorodnitsyn V.A. Gruppye svoistva raznostnykh uravnenii [Group properties of difference equations]. Moscow: Fizmatlit, 2001, 236 p.
42. Tikhonov V.I. Optimal'nyi priem signalov [Optimum signal reception]. Moscow: Radio i sviaz', 1983, 320 p.
43. Kobzar' A.I. Prikladnaia matematicheskaia statistika [Applied mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 628 p.
44. Lagutin M.B. Nagliadnaia matematicheskaia statistika [Visual mathematical statistics]. Moscow: P-tsentr, 2003, 345 p.
45. Martiushev D.A., Iliushin P.Iu. Ekspress-otsenka vzaimodeistviiia mezhdru dobyvaiushchimi i nagnetatel'nymi skvazhinami na turne-famenskoii zalezhi Ozernogo mestorozhdeniia [Express assessment of the interaction between the production and injection wells in the Tournaisian-Famennian deposits of Ozernoe field]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2016, no. 18, pp. 33-41. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.4

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.