Недропользование. 2025. Т. 25, № 4. С.349-355. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.9

ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №4 2025
Домашняя страница журнала: https://ered.pstu.ru/index.php/geo

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.276.43
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Многофакторный анализ эффективности системы заводнения с применением аналитических методик

А.И. Кириллов, А.В. Демченко

Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (Российская Федерация, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 168А)

Multivariate Analysis of the Efficiency of a Waterflooding System using Analytical Techniques

Aleksandr I. Kirillov, Aleksandr V. Demchenko

TatNIPIneft R&D Institute of the PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin (186a Sovetskaya st., Almetyevsk, 423462, Russian Federation)

Получена / Received: 02.06.2025. Принята / Accepted: 31.10.2025. Опубликована / Published: 21.11.2025

Ключевые слова:
непроизводительная закачка, компенсация отборов, система поддержания пластового давления, элементы заводнения, зоны снижения пластового давления, карты компенсации отборов, метод материального баланса.

Одной из актуальных задач в нефтедобыче является рациональная довыработка остаточных запасов с целью достижения максимального рентабельного коэффициента извлечения нефти. Для поддержания эффективности процесса вытеснения на поздней стадии разработки необходимо своевременное проведение оптимизационных работ по регулированию системы заводнения, также следует учитывать такие проблемы, как неравномерная выработка запасов, разбалансированность системы разработки, наличие непроизводительной закачки. Рассматривается Акташская площадь Ново-Елховского месторождения, характеризующаяся неоднородным строением и слиянием пластов, что создает сложности в оценке компенсации отборов жидкости и определения непроизводительной закачки. Целью данной работы является рассмотрение различных методик для решения этой задачи: построение карты компенсации на основе ячеек заводнения и многофакторный расчет компенсации. Первая методика позволяет выделить локальные участки с недокомпенсацией отборов или перекомпенсацией. Вторая методика, основанная на многофакторном подходе, учитывает различные параметры, такие как проводимость пласта, пространственное расположение скважин, фильтрационные свойства и другие, что позволяет более точно оценить влияние закачки на добычу и помогает в адресном планировании мероприятий по регулированию системы поддержания пластового давления. Установлено, что применение методики многофакторного анализа эффективности системы заводнения позволяет выделять участки с непроизводительной закачкой, по полученным картам можно сделать довольно точные выводы, которые коррелируют с анализом работы конкретных скважин, демонстрирующие прямое влияние нагнетательных скважин на добычу. Полученные выводы направлены на поддержание оптимального пластового давления, оптимизацию фильтрационных потоков и вовлечение ранее недостаточно дренируемых запасов в разработку путем регулирования режимов работы добывающих и нагнетательных скважин.

Keywords:
non-productive injection, compensation of production losses, reservoir pressure maintenance system, flooding elements, zones of reduced reservoir pressure, compensation maps of production losses, material balance method.

One of the pressing challenges in oil production is the efficient development of residual reserves to achieve the maximum economic oil recovery factor. To maintain the efficiency of the displacement process in the late stages of development, timely optimization of the waterflooding system is essential. Issues such as uneven reserve recovery, imbalances in the development system, and unproductive injection must also be considered. The Aktashskaya area of the Novo-Yelkhovskoye field is considered. It is characterized by a heterogeneous structure and merging of formations, which creates difficulties in assessing fluid production compensation and identifying unproductive injection. The objective of this paper is to examine various methods for solving this problem: constructing a compensation map based on waterflooding cells and a multivariate compensation calculation. The first method allows for the identification of localized areas with under- or over-compensation of production. The second methodology, based on a multivariate approach, takes into account various parameters such as reservoir conductivity, well spacing, filtration properties, and others, allowing for a more accurate assessment of the impact of injection on production and assisting in targeted planning of reservoir pressure maintenance measures. It has been established that the application of a multivariate analysis of waterflooding system efficiency allows for the identification of areas with unproductive injection. The resulting maps allow for fairly accurate conclusions that correlate with the analysis of specific well performance, demonstrating the direct impact of injection wells on production. These findings are aimed at maintaining optimal reservoir pressure, optimizing filtration flows, and bringing previously under-drained reserves into development by regulating the operating modes of production and injection wells.

Кириллов Александр Иванович – кандидат технических наук, начальник отдела разработки нефтяных месторождений (e-mail: KirillovAleksandrI@tatnipi.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00, доб. 53275).
Демченко Александр Валерьевич – ведущий специалист отдела разработки нефтяных месторождений (e-mail: Demchenko-AV@tatnipi.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00, доб. 53323).

Aleksandr I. Kirillov – PhD in Engineering, Head of the Oil Field Development Department (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: KirillovAleksandrI@tatnipi.ru). The contact person for correspondence.
Aleksandr V. Demchenko – Leading Specialist at the Oil Field Development Department (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: Demchenko-AV@tatnipi.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Кириллов, А.И. Многофакторный анализ эффективности системы заводнения с применением аналитических методик / А.И. Кириллов, А.В. Демченко // Недропользование. – 2025. – Т.25, №4. – С. 349–355. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.9

Please cite this article in English as:
Kirillov A.I., Demchenko A.V. Multivariate Analysis of the Efficiency of a Waterflooding System using Analytical Techniques. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.4, pp. 349-355. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.9

Введение

На сегодняшний день одна из самых актуальных задач в нефтедобыче – рациональная довыработка остаточных запасов истощенных месторождений с целью достижения максимального рентабельного коэффициента извлечения нефти (КИН). Важным вопросом является оценка потенциала увеличения добычи за счет оптимизации системы поддержания пластового давления (ППД), так как все процессы, происходящие в пласте, взаимосвязаны, и все нарастающие проблемы при эксплуатации скважин связаны в том числе с эффективностью системы заводнения. В настоящее время наиболее остро стоит вопрос оценки компенсации отборов жидкости закачкой.

В данной работе авторы рассматривают объекты $Д_0$ и $Д_1$ Акташской площади Ново-Елховского месторождения. Объект $Д_0$ имеет площадное распространение. Выделяемые песчано-алевритовые пласты разделены плотными и глинистыми породами. В результате неоднородного строения объекта выделяются высокопродуктивные фильтрационные каналы субширотного направления (проницаемость более 4000 мД при средней проницаемости по керну 631 мД).

Пласты $Д_1а$, $Д_1б_1$, $Д_1б_{2+3}$, $Д_1в$, $Д_1г$ и $Д_1д$ пашийского горизонта представлены как единый подсчетный объект $Д_1$. В то же время в разрезе пашийского горизонта повсеместно наблюдаются слияния пластов в различных сочетаниях. Слияние верхне- и нижнепашийской пачек происходит в 132 скважинах. Слияние пластов $Д_1а$, $Д_1б_1$, $Д_1б_{2+3}$ верхнепашийской пачки – в 619 скважинах, причем в 335 из них сливаются все три пласта. Слияние пластов $Д_1в$, $Д_1г$ и $Д_1д$ нижнепашийской пачки – в 262 скважинах, причем в 125 из них сливаются все три пласта. В работах [1–4] приводится алгоритм оценки и учета влияния прерывистости пластов на эффективность заводнения.

Основным критерием оценки сбалансированности системы ППД является оценка компенсации отборов закачкой в пластовых условия. При этом при выборе групп (ячеек заводнения) добывающих и нагнетательных скважин, участвующих в расчете компенсации, может дать лишь осредненный (грубый) результат. К тому же теряется адресность (локализация) проблемного недокомпенсированного либо перекомпенсированного участка, на который должны быть направлены будущие мероприятия по регулированию системы ППД. Распространение фронта заводнения по площади рассматриваемой залежи и методы группировки скважин рассматривались в работах [5–15].

Для оценки компенсации отборов жидкости закачкой предлагается использовать две методики. Первая заключается в построении карты компенсации, основанной на ячейках заводнения [5, 8, 9], где компенсация считается для группы скважин, ограниченной данной ячейкой. На рис. 1 приведена карта соответствия пластового давления и компенсации отборов закачкой по площади, на которой отмечаются как локальные участки снижения пластового давления, сопровождающиеся недокомпенсацией отборов либо недостаточным влиянием системы ППД, так и участки с компенсацией отборов более 200 %, что может свидетельствовать как о неравномерности влияния системы заводнения, так и об отсутствии влияния на зоны отбора.

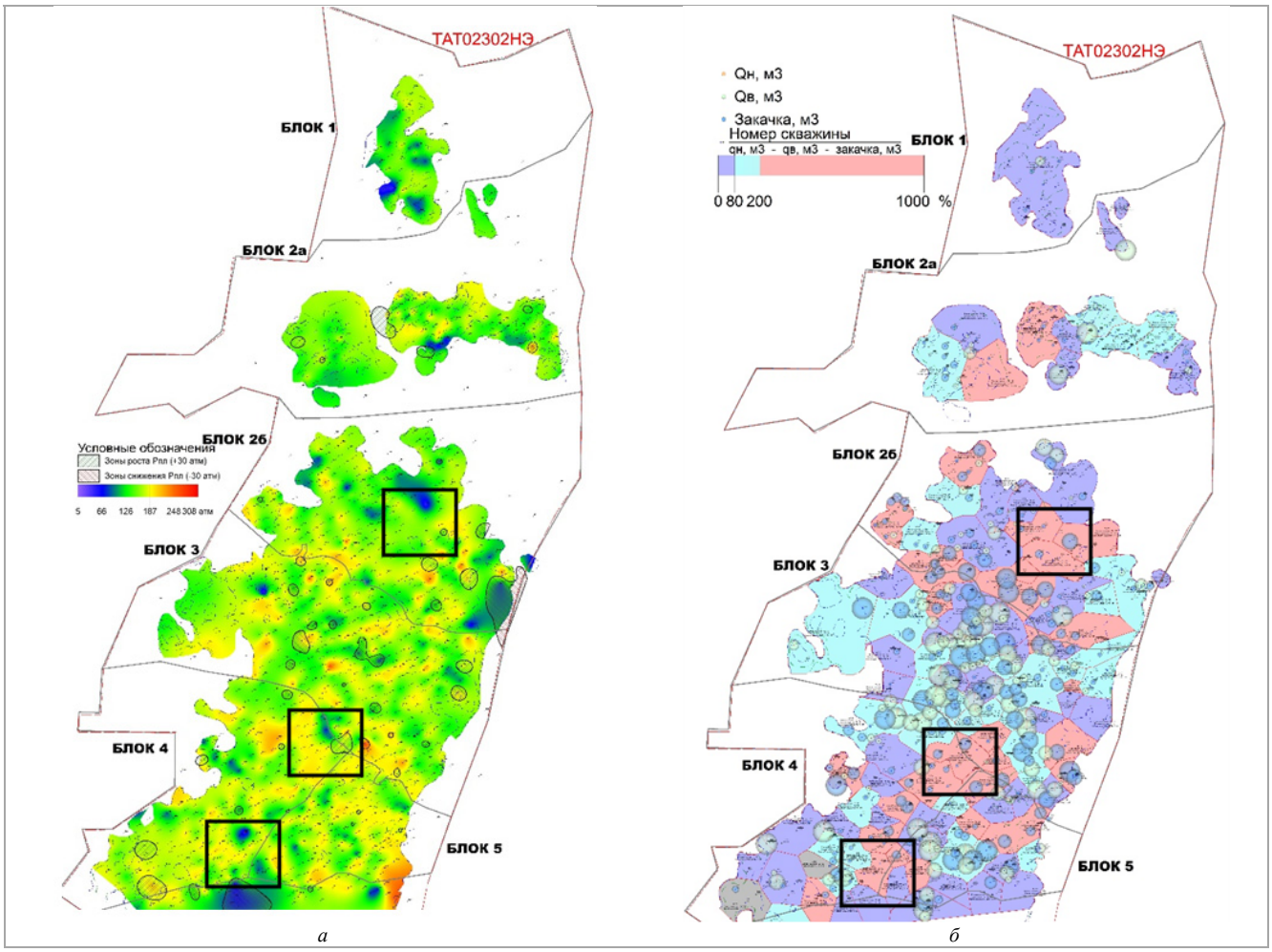


Рис. 1. Карты пластовых давлений объекта $D_0 + D_1$ на 01.01.2024 (*а*) и компенсации отборов за период с 01.01.2022 по 01.12.2024 (*б*)

По методу материального баланса рассчитаны объемы непроизводительной закачки по блокам (таблица).

Достижение абсолютно равномерного распределения компенсации отборов по площади объекта на данный момент не представляется возможным вследствие ряда причин, таких как взаимная интерференция скважин, неоднородность фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пласта, технические ограничения наземной части системы ППД. Оптимизация системы заводнения путем регулирования приемистости нагнетательных скважин на сегодняшний день является перспективным направлением совершенствования сформированной системы разработки.

После определения проблемного блока заводнения для оптимизации режимов работы скважин необходимо перейти к анализу участка.

Методика заключается в анализе результатов проведенных промыслово-геофизических исследований (ПГИ), по результатам профилей притока в добывающих скважинах и профилей приемистости в нагнетательных скважинах оценивается охват продуктивного пласта заводнением:

$$K_{охв} = h_{раб} / h_{перф}, \quad (1)$$

где $h_{раб}$ – работающая толщина пласта; $h_{перф}$ – перфорированная толщина пласта.

На примере участка нагнетательных скв. **39, **68, **91, **32 (рис. 2) показан элемент заводнения и возможное влияние на добывающие скв. **86, ***1А.

У добывающей скв. **86 перфорирован пласт $Д_1а$ и $Д_1б_1$ и, согласно ПГИ, работающий пласт Д1б1. У нагнетательных скв. **39, **68, **91 перфорированы интервалы $Д_1б_{2+3}$ (рис. 3, *а*), а также по скв. **39 – $Д_1б_1$ (рис. 3, *б*).

В результате анализа работы нагнетательных и реагирующих добывающих скважин сделан вывод, что прослеживается прямое влияние нагнетательных скв. **39 и **91 на добывающую **86 вследствие того, что при увеличении закачки увеличивается дебит жидкости и забойное давление (рис. 5). Влияние нагнетательной скв. **32 на окружающие добывающие скважины не выявлено.

Аналогично от нагнетательной скв. **39 прослеживается прямое влияние на добывающую ***1А, при увеличении закачки увеличивается дебит жидкости и забойное давление (рис. 5). Снижение дебита нефти и жидкости в период с апреля 2024 г. потенциально связано с нарушением эксплуатационной колонны нагнетательной скв. **39. Также можно положительно оценить влияние нагнетательной скв. **68 на добывающую ***1А, при увеличении закачки по добывающей скв. ***1А увеличивается дебит жидкости и забойное давление.

Вторая методика основана на многофакторном расчете компенсации, описанном в работах [8, 9, 13–19]. В основе методики оценки системы заводнения лежит расчет компенсации отборов каждой скважины, участвовавшей в добыче на основе распределения объемов закачки на реагирующие скважины с использованием многофакторного подхода, где количество воды, поступившей к конкретной добывающей от конкретной нагнетательной скважины, рассчитывается следующим образом:

$$V_i = Q_{зак} \cdot \varphi_i, \quad (2)$$

где φ_i – текущая величина распределения закачки для конкретной добывающей скважины:

Оценка непроизводительной закачки по блокам

Параметр	Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4	Блок 5
Площадь участка, га	1,5	10,4	8,8	5,6	2,9
Проводимость из аквифера в пласт, тыс. м^3/атм	1,5	19	28,4	9	9,2
Накопленный ВНФ, т/т	4,7	2,7	3,0	2,5	3,9
Накопленная компенсация, %	131,6	113,0	123,8	131,8	111,0
Объем непроизводительной закачки, %	20,3	11,6	19,2	25,2	6,6

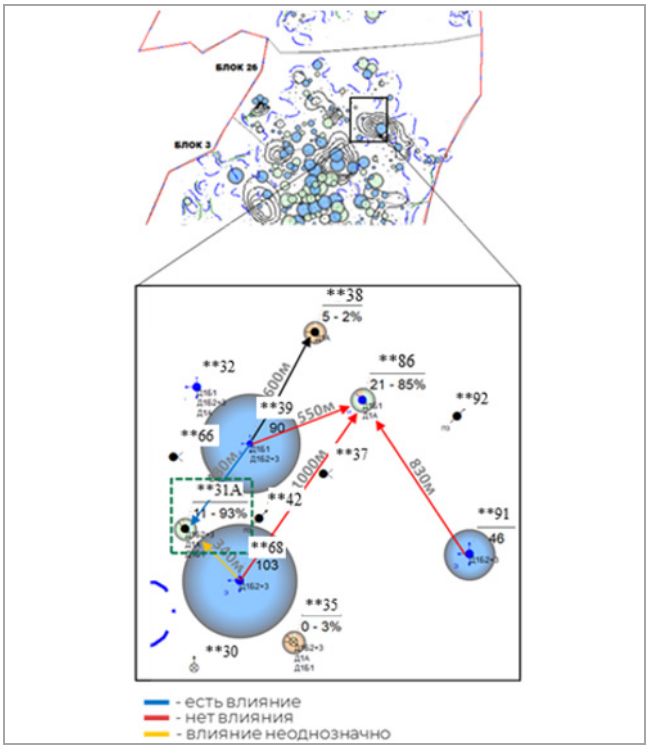


Рис. 2. Карта участка взаимовлияния элемента нагнетательных скв. **39, **68, **91, **32 и реагирующих добывающих скв. **86, ***1А

$$\varphi_i = \varphi_{об} \cdot \gamma_1 + \varphi_{пр} \cdot \gamma_2 + \varphi_{стр} \cdot \gamma_3 + \varphi_{kh} \cdot \gamma_4, \quad (3)$$

где $\varphi_{об}$ – объемный фактор распределения закачки, чем больше отборы жидкости скважиной, тем больше коэффициент, так как сильнее снижается пластовое давление в области дренирования и, соответственно, больше закачиваемой воды стремится в эту зону; $\varphi_{пр}$ – пространственный фактор, чем ближе добывающая скважина находится от нагнетательной, тем большую долю закачки она принимает на себя; $\varphi_{стр}$ – структурный фактор, характеризует разницу абсолютной глубины залегания кровли пласта, вскрытого той или иной добывающей скважиной относительно других добывающих скважин в элементе; φ_{kh} – фильтрационный фактор, физическая сущность учета проводимости пласта состоит в предположении о приоритетном движении закачиваемой воды по более высокопродуктивным направлениям; γ_n – весовые доли факторов, позволяющие учесть возможность различной значимости того или иного фактора в распределении закачки.

Итоговая формула для расчета количества воды, поступившей к конкретной добывающей скважине, примет вид:

$$\text{Текущая компенсация} = \frac{\text{Текущая закачка воды} \cdot \text{коэф. распределения закачки}}{\text{Текущая добыча жидкости}}, \quad (4)$$

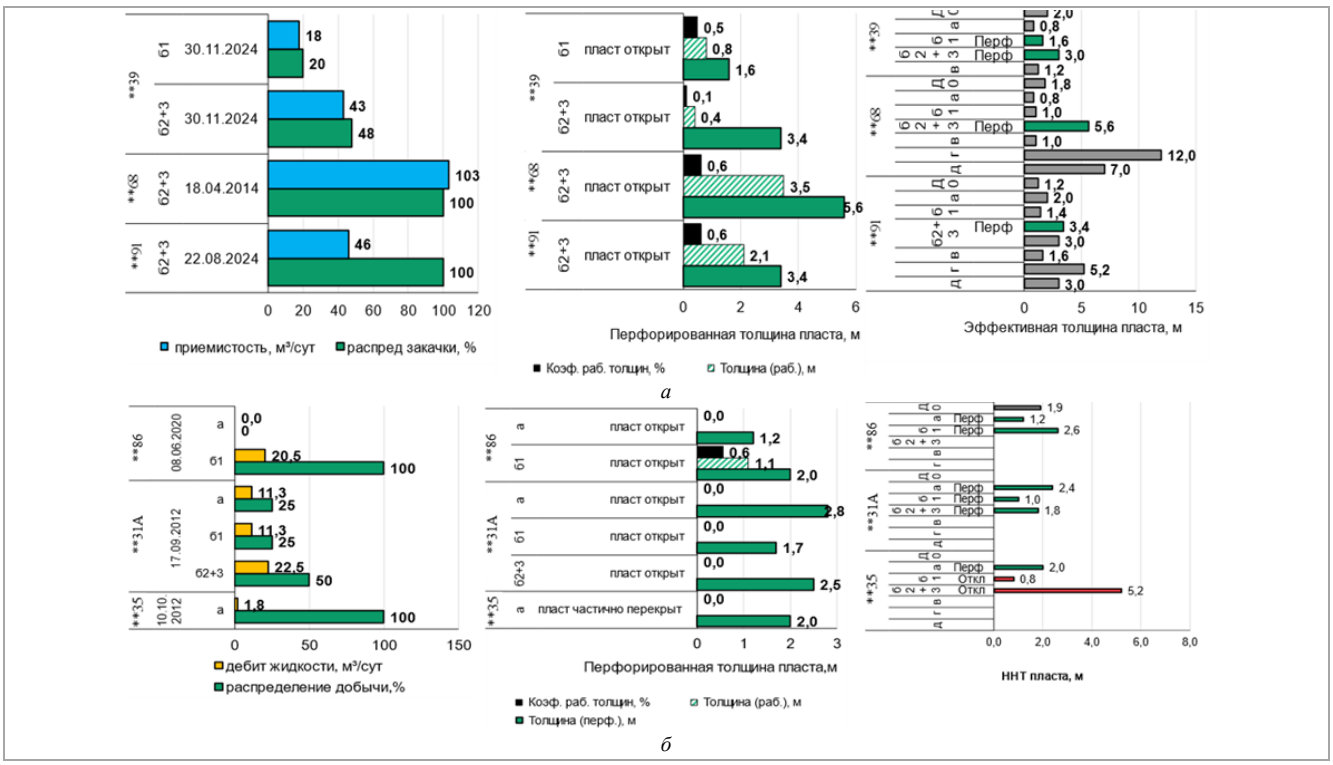


Рис. 3. Распределение: *а* – закачки по пластам нагнетательных скв. **39, **68, **91; *б* – добычи по пластам добывающих скв. **86, ***1А

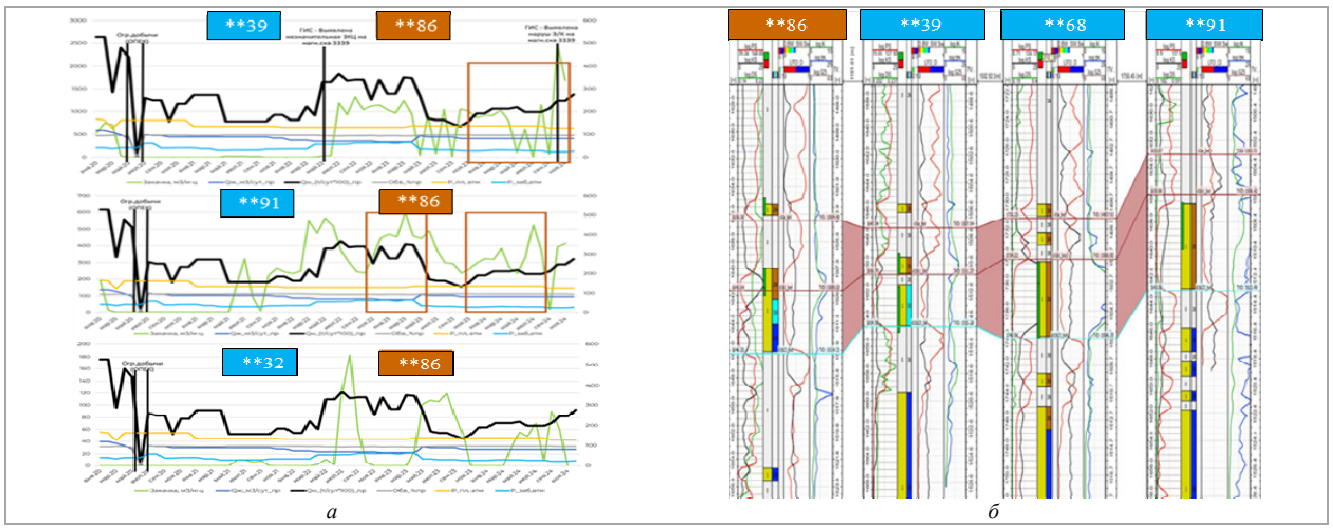


Рис. 4. Анализ зон отбора и закачки (*а*) и корекционная схема (*б*) элемента скв. **86

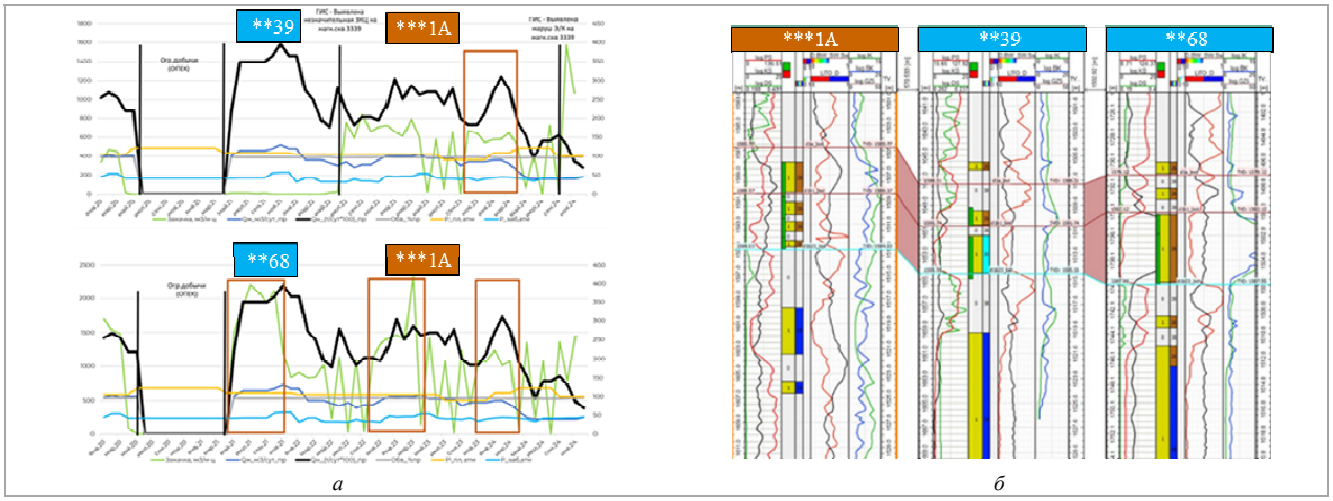


Рис. 5. Анализ зон отбора и закачки (*а*) и корреляционная схема (*б*) элемента скв. ***1A

В рамках многофакторного расчета компенсации с учетом специфики рассматриваемых объектов было принято решение провести расчет накопленной компенсации за трехлетний период.

Для снижения потенциальной ошибки на предварительном этапе была проведена работа с архивом перфораций и ПГИ, определены потенциально реагирующие скважины для каждого отчетного периода. В расчете учитывались перфорированные пласты в паре скважин (нагнетательная и добывающая) за конкретный период, а также «слитые» пласты, через которые теоретически может поступать закачиваемая вода в реагирующую добывающую скважину. Для выполнения данной задачи написан скрипт на языке python [20–29], в котором расчет выполнялся с месячным шагом с учетом всех перечисленных факторов, включая возможные периоды бездействия скважин, полученные значения накопленных отборов и закачки суммированы.

На рис. 6 приведена полученная карта компенсации за период с 01.01.2022 по 01.12.2024, построенная с учетом многофакторного расчета с выделением зон перекомпенсации.

Полученная карта служит основой для принятия стратегических решений по управлению разработкой нефтяного месторождения в целом, а не только для решения локальных технологических задач в призабойной зоне отдельных скважин [30–38]. При этом не ставится цель достичь 100 % компенсации по всем блокам, а акцент делается на постепенное выполнение мероприятий, направленных на достижение целевых показателей, обеспечивающих равномерное распределение закачиваемых агентов по площади и разрезу.

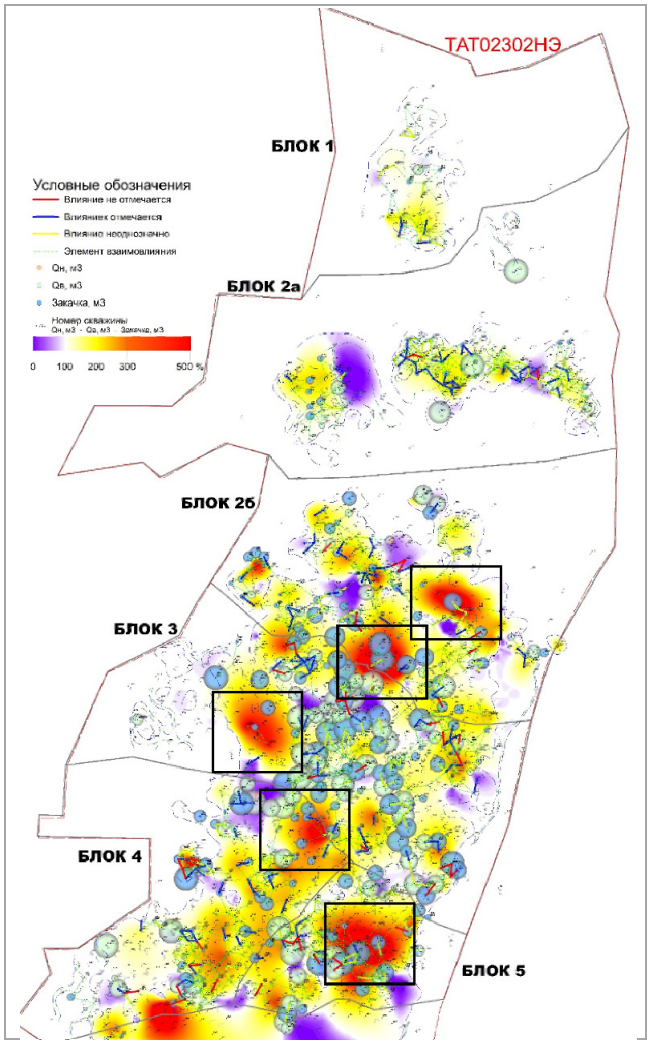


Рис. 6. Карта компенсации отборов за период с 01.01.2022 по 01.12.2024

Заключение

Авторами применены различные методы оценки компенсации отборов, опробованы и адаптированы к условиям объектов $Д_0$, $Д_1$ Ново-Елховского месторождения, рассмотрена практическая применимость «блочно-поскважинного» метода для различных условий анализа, что позволяет выделять участки с непроизводительной закачкой для достижения и поддержания оптимального пластового давления, оптимизации фильтрационных потоков и вовлечение ранее недостаточно дренируемых запасов в разработку путем регулирования режимов работы добывающих и нагнетательных скважин.

Библиографический список

1. Исследование влияния прерывистости пласта на коэффициент охвата процессом вытеснения / В.М. Ревенко [и др.] // Проблемы нефти и газа Тюмени. – 1984. – Вып. 61. – С. 31–33.
2. Бадьянов, В.А. Методы компьютерного моделирования в задачах нефтепромысловой геологии. – 2-е изд., доп. / В.А. Бадьянов. – Тюмень: Шадринский Дом Печати, 2011. – 184 с.
3. Совершенствование систем разработки нефтяных месторождений Западной Сибири / В.А. Бадьянов [и др.]; под ред. Н.К. Праведникова. – Свердловск: Средне-Уральское кн. изд-во, 1975. – 175 с.
4. Атанов, Г.А. К вопросу прогнозирования разработки нефтяных месторождений по промысловым данным / Г.А. Атанов, А.И. Вашуркин, В.М. Ревенко // Проблемы нефти и газа Тюмени. – 1973. – № 17. – С. 35–37.
5. Ignatov, I. An Algorithm for Automated Identification of Waterflood Pattern Elements / I. Ignatov // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Nov. 11-14, 2019. – Abu Dhabi, 2019 – SPE-197126-MS. DOI: 10.2118/197126-MS
6. Сургучев, М.Л. Факторы, влияющие на состояние остаточной нефти в заводненных пластах / М.Л. Сургучев, Э.М. Симкин // Нефтяное хозяйство. – 1988. – № 9. – С. 31–36.
7. Методы извлечения остаточной нефти / М.Л. Сургучев [и др.]. – М.: Недра, 1991. – 347 с.
8. Методические указания по геолого-промысловому анализу разработки нефтяных и газонефтяных месторождений: дата введения с 01.03.2002 г. / В.Ф. Базив [и др.]; ФГУ «Экспертнефтегаз». – М., 2002. – 119 с.
9. Антонов, М.С. Компенсационное регулирование заводнения с целью повышения эффективности энергетического поля нефтяного пласта: автореф. дис... канд. техн. наук: 25.00.17 / М.С. Антонов; ГУП «ИПТЭР»; науч. рук. Д.К. Сагитов. – Уфа, 2011. – 24 с.
10. Антонов, М.С. Оптимизация системы заводнения путем построения карт текущей и накопленной компенсации на примере колганской толщи Вахитовского нефтяного месторождения / М.С. Антонов // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 3. – С. 17–20.
11. Оценка момента прорыва закачиваемых вод к добывающим скважинам Вахитовского нефтяного месторождения / В.В. Орехов [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 1. – С. 68–70.
12. Регулирование энергетического состояния залежи на примере колганского объекта Вахитовского нефтяного месторождения / В.В. Орехов [и др] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 1. – С. 75–79.
13. Анкудинов, А.А. Методика анализа эффективности систем заводнения путем оценки распределения закачки / А.А. Анкудинов // XII Конференция молодых специалистов работающих в организациях, осуществляющих деятельность, связанную с использованием участков недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: сб. материалов конф., Ханты-Мансийск, 15–18 мая 2012 г. – Новосибирск: Технопарк высоких технологий, 2012. – С. 87–91.
14. Анкудинов, А.А. Совершенствование разработки нефтяных месторождений на основе многофакторного анализа эффективности системы заводнения / А.А. Анкудинов, Л.А. Ваганов // НЕФТЬГАЗТЭК: сб. материалов Тюменского междунар. инновационного форума, Тюмень, 17-18 сент., 2013 г. – Тюмень: ТИУ, 2013. – С. 35–38.
15. Анкудинов, А.А. Методика распределения объемов закачиваемой воды по площади нефтяного месторождения / А.А. Анкудинов, Л.А. Ваганов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождения. – 2013. – № 9. – С. 19–24.

16. Сагитов, Д.К. Оперативная коррекция компенсации отборов закачкой на нефтяных месторождениях / Д.К. Сагитов, А.А. Хальзов, В.А. Лепихин // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 1 – С. 26–28.
17. Соболева, Е.В. Блочный анализ текущей компенсации отборов жидкости закачкой и обоснование коэффициента эффективности закачки / Е.В. Соболева, О.А. Третьякова // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 5 – С. 34–38.
18. Ваганов, Л.А. Многофакторный подход к оценке воздействия закачкой / Л.А. Ваганов, Ю.Е. Радевич, А.А. Анкудинов // Наука и ТЭК. – 2012. – № 2 – С. 39–42.
19. Расчет оптимальной приемистости нагнетательных скважин в условиях площадной системы заводнения / Л.А. Ваганов [и др] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 6 – С. 63–67.
20. Таршхоева, Ж.Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python / Ж.Т. Таршхоева // Молодой ученый. – 2021. – № 5. – С. 20–21.
21. Галимуллин, Н.Р. Python: использование Python для автоматизации повседневных задач / Н.Р. Галимуллин // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 9, № 9. – С. 69–76.
22. Семенов, И.А. Использование возможностей библиотеки Matplotlib для визуализации данных в работе инженеров и исследователей / И.А. Семенов, М.Д. Шишкин // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2024.– № 1. – С. 169–170.
23. Дрянкова, Д.А. Обработка пропущенных значений и дубликатов в данных с помощью библиотеки Pandas для языка программирования Python [Электронный ресурс] / Д.А. Дрянкова // Дневник науки: электрон. науч. журнал. – 2023. – № 6. – 7 с. – URL: https://dnevniknauki.ru/images/publications/2023/6/technics/Dryakova3.pdf (дата обращения: 20.06.2025).
24. Hunter, J.D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment / J.D. Hunter // Computing in Science & Engineering. – 2007. – Vol. 9, iss. 3. – P. 90–95.
25. Van der Walt, S. The NumPy Array: A Structure For Efficient Numerical Computation Varoquaux / S. Van der Walt, S.C. Colbert, G. Varoquaux // Computing in Science & Engineering. – 2011. – Vol. 13. – 8 p.
26. Array programming with NumPy / C.R. Harris [et al.] // Nature. – 2020. – Vol. 585 – P. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2
27. Li, Ya. Exploring Indexing and Slicing in NumPy Arrays / Li Ya, Shao Yu., Fu Ch. // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2832. – 8 p.
28. McKinney, W. Data Structures for Statistical Computing in Python / W. McKinney // SciPy 2010: Proceedings of the 9th Python in Science Conference, Austin, Texas, June 28 – July 3, 2010. – 2010. – P. 56–61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a
29. Waskom. M.L. Seaborn: Statistical Data Visualization / M.L. Waskom // Journal of Open Source Software. – 2021. – Vol. 6. – 4 p.
30. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений на поздней стадии эксплуатации / Д.Ю. Крянев [и др.] // Методы увеличения нефтеотдачи пластов с трудноизвлекаемыми запасами: тр. / ВНИИнефть. – М., 2007. – Вып. 136. – С. 6–19.
31. Методика построения карт зон воздействия нагнетательных скважин / Е.П. Жеребцов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 8. – С. 27–29.
32. Королев, М.С. Оценка эффективности и оптимизация систем поддержания пластового давления / М.С. Королев, С.С. Королев // Территория Нефтегаз. – 2009. – № 8. – С. 74–78.
33. Королев, М.С. Разработка и исследование технико-технологических параметров регулирования систем поддержания пластового давления: автореф. дис… канд. техн. наук: 25.00.17 / М.С. Королев; ТюмГНГУ. – Тюмень, 2008. – 24 с.
34. Полякова, Н.И. Комплексный подход к применению методов анализа эффективности системы заводнения нефтяных пластов / Н.И. Полякова, Ю.А. Максимова, П.Н. Зятиков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 10. – С. 91–98.
35. Рахмаев, Л.Г. О возможности оптимизации режима закачки нагнетательных скважин в условиях Восточно-Лениногорской площади Ромашкинского месторождения [Электронный ресурс] / Л.Г. Рахмаев, Р.Х. Низаев, Ю.А. Гуторов // Нефтяная провинция. – 2016. – № 3. – С. 61–86. – URL: https://2d5385f0-870f-473a-b271-aa454e83c7c1.filesusr.com/ugd/2e67f9_7c99c03d48814383b1bb80d26d37d3da.pdf (дата обращения: 20.06.2025).
36. Анализ эффективности заводнения месторождений на поздней стадии разработки / И.Г. Фаттахов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 8. – С. 42–46. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-8-42-46
37. Анализ взаимовлияния скважин по результатам мониторинга на основе секторного моделирования / Д.Н. Гуляев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 5. – С. 82–85.
38. Проблематика оценки взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин на основе математического моделирования / С.В. Степанов [и др.] // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 146–164.

References

1. Revenko V.M. et al. Issledovanie vliianiia preryvistosti plasta na koeffitsient okhvata protsessom vytesneniia [Study of the influence of reservoir discontinuity on the sweep efficiency of the displacement process]. *Problemy nefti i gaza Tiumeni*, 1984, iss. 61, pp. 31-33.
2. Bad'ianov V.A. Metody komp'iuternogo modelirovaniia v zadachakh neftepromyslovoi geologii [Computer modeling methods in oil field geology problems]. 2dn ed. Tiumen': Shadrinskii Dom Pechati, 2011, 184 p.
3. Bad'ianov V.A. ed al. Sovershenstvovanie sistem razrabotki neftianykh mestorozhdenii Zapadnoi Sibiri [Improving oil field development systems in Western Siberia]. Ed. N.K. Pravednikov. Sverdlovsk: Sredne-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo, 1975, 175 p.
4. Atanov G.A., Vashurkin A.I., Revenko V.M. K voprosu prognozirovaniia razrabotki neftianykh mestorozhdenii po promyslovym dannym [On the issue of forecasting the development of oil fields based on field data]. *Problemy nefti i gaza Tiumeni*, 1973, no. 17, pp. 35-37.
5. Ignatov I. An Algorithm for Automated Identification of Waterflood Pattern Elements. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Nov. 11-14, 2019*. Abu Dhabi, 2019, SPE-197126-MS. DOI: 10.2118/197126-MS
6. Surguchev M.L., Simkin E.M. Faktory, vliiaiushchie na sostoianie ostatochnoi nefti v zavodnennykh plastakh [Factors Affecting the State of Residual Oil in Waterflooded Reservoirs]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1988, no. 9, pp. 31-36.
7. Surguchev M.L. et al. Metody izvlecheniia ostatochnoi nefti [Methods for extracting residual oil]. Moscow: Nedra, 1991, 347 p.
8. Baziv V.F. et al. Metodicheskie ukazaniia po geologo-promyslovomu analizu razrabotki neftianykh i gazoneftianykh mestorozhdenii [Guidelines for geological and field analysis of the development of oil and gas fields]. Data vvedeniia s 01.03.2002. Moscow: FGU “Ekspertneftegaz”, 2002, 119 p.
9. Antonov M.S. Kompensatsionnoe regulirovanie zavodneniia s tsel'iu povysheniia effektivnosti energeticheskogo polia neftianogo plasta [Compensatory regulation of waterflooding to improve the efficiency of the energy field of an oil reservoir]. Abstract of Ph. D. thesis. Ufa, 2011, 24 p.
10. Antonov M.S. Optimizatsiia sistemy zavodneniia putem postroeniia kart tekushchei i nakoplennoi kompensatsii na primere kolganskoi tolshchi Vakhitovskogo neftianogo mestorozhdeniia [Optimization of the waterflooding system by constructing maps of current and accumulated compensation using the example of the Kolgan formation of the Vakhitovsky oil field]. *Neftepromyslovoe delo*, 2011, no. 3, pp. 17-20.
11. Orekhov V.V. et al. Otsenka momenta proryva zakachivaemykh vod k dobyvaiushchim skvazhinam Vakhitovskogo neftianogo mestorozhdeniia [Calculation of the moment of pumped water leakage to producing wells of Vakhitovsky oil field]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2010, no. 1, pp. 68-70.
12. Orekhov V.V. et al. Regulirovanie energeticheskogo sostoianiia zalezhi na primere kolganskogo ob"ekta Vakhitovskogo neftianogo mestorozhdeniia [Regulating the energy state of a deposit using the example of the Kolgansky object of the Vakhitovsky oil field]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2010, no. 1, pp. 75-79.
13. Ankudinov A.A. Metodika analiza effektivnosti sistem zavodneniia putem otsenki raspredeleniia zakachki [Methodology for analyzing the efficiency of waterflooding systems by assessing the injection distribution]. *XII Konferentsiia molodykh spetsialistov rabotaiushchikh v organizatsiiakh, osushchestvliaiushchikh deiatel'nost', sviazannuiu s ispol'zovaniem uchastkov nedr na territorii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga - Iugry. Sbornik materialov konferentsii, Khanty-Mansiisk, 15-18 May 2012*. Novosibirsk: Tekhnopark vysokikh tekhnologii, 2012, pp. 87-91.
14. Ankudinov A.A., Vaganov L.A. Sovershenstvovanie razrabotki neftianykh mestorozhdenii na osnove mnogofaktornogo analiza effektivnosti sistemy zavodneniia [Improving oil field development based on multivariate analysis of waterflooding system efficiency]. *NEFT"GAZTEK. Sbornik materialov Tiumenskogo mezhdunarodnogo innovatsionnogo foruma, Tiumen', 17-18 September 2013*. Tiumen': Tiumenskii industrial'nyi universitet, 2013, pp. 35-38.
15. Ankudinov A.A., Vaganov L.A. Metodika raspredeleniia ob"emov zakachivaemoi vody po ploshchadi neftianogo mestorozhdeniia [Method of distribution of injected water volumes along the square of an oil field]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdeniia*, 2013, no. 9, pp. 19-24.
16. Sagitov D.K., Khal'zov A.A., Lepikhin V.A. Operativnaia korrektsiia kompensatsii otborov zakachkoi na neftianykh mestorozhdeniiakh [Operational correction of injection compensation at oil fields]. *Neftepromyslovoe delo*, 2012, no. 1, pp. 26-28.
17. Soboleva E.V., Tret'iakova O.A. Blochnyi analiz tekushchei kompensatsii otborov zhidkosti zakachkoi i obosnovanie koeffitsienta effektivnosti zakachki [Block analysis of the current compensation of liquid withdrawal by injection and justification of the injection efficiency coefficient]. *Neftepromyslovoe delo*, 2021, no. 5, pp. 34-38. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-5(629)-34-38
18. Vaganov L.A., Radevich Iu.E., Ankudinov A.A. Mnogofaktornyi podkhod k otsenke vozdeistviia zakachkoi [A multivariate approach to assessing the impact of injection]. *Nauka i TEK*, 2012, no. 2, pp. 39-42.
19. Vaganov L.A. et al. Raschet optimal'noi priemistosti nagnetatel'nykh skvazhin v usloviiakh ploshchadnoi sistemy zavodneniia [Calculation of optimal injection rate for dispersed waterflooding system]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2017, no. 6, pp. 63-67.
20. Tarshkhoeva Zh.T. Iazyk programmirovaniia Python. Biblioteki Python [Python Programming Language. Python Libraries]. *Molodoi uchenyi*, 2021, no. 5, pp. 20-21.
21. Galimullin N.R. Python: ispol'zovanie Python dlia avtomatizatsii povsednevnykh zadach [Python: using python to automate everyday tasks]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniia*, 2024, vol. 9, no. 9, pp. 69-76. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.010

22. Semenov I.A., Shishkin M.D. Ispol'zovanie vozmozhnostei biblioteki Matplotlib dlia vizualizatsii dannykh v rabote inzhenerov i issledovatelei [Sing the potential of the Matplotlib library for data visualization in the work of engineers and researchers]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress*, 2024, no. 1, pp. 169-170. DOI: 10.36629/2686-9896-2024-1-169-170
23. Driankova D.A. Obrabotka propushchennykh znachenii i dublikatov v dannykh s pomoshch'iu biblioteki Pandas dlia iazyka programmirovaniia Python [Processing of missing values and duplicates in data using the Pandas library for the Python programming language]. *Dnevnik nauki. Elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2023, no. 6, 7 p., available at: https://dnevniknauki.ru/images/publications/2023/6/technics/Dryakova3.pdf (accessed 20 June 2025). DOI: 10.51691/2541-8327_2023_6_11
24. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 2007, vol. 9, iss. 3, pp. 90-95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55
25. Van der Walt S., Colbert S.C., Varoquaux G. The NumPy Array: A Structure For Efficient Numerical Computation Varoquaux. *Computing in Science & Engineering*, 2011, vol. 13, 8 p. DOI: 10.1109/MCSE.2011.37
26. Harris C.R. et al. Array programming with NumPy. *Nature*, 2020, vol. 585, pp. 357-362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2
27. Li Ya., Shao Yu., Fu Ch. Exploring Indexing and Slicing in NumPy Arrays. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2832, 8 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2832/1/012019
28. McKinney W. Data Structures for Statistical Computing in Python. *SciPy 2010: Proceedings of the 9th Python in Science Conference, Austin, Texas, June 28 - July 3, 2010*. 2010, pp. 56-61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a
29. Waskom M.L. Seaborn: Statistical Data Visualization. *Journal of Open Source Software*, 2021, vol. 6, 4 p. DOI: 10.21105/joss.03021.
30. Krianev D.Iu. et al. Povyshenie effektivnosti razrabotki neftianykh mestorozhdenii na pozdnei stadii ekspluatatsii [Improving the efficiency of late-stage oil field development]. *Metody uvelicheniia nefteotdachi plastov s trudnoizvlekaemymi zapasami. Trudy VNIIneft'*. Moscow, 2007, iss. 136, pp. 6-19.
31. Zherebtsov E.P. et al. Metodika postroeniia kart zon vozdeistviia nagnetatel'nykh skvazhin [Methodology for constructing maps of injection well impact zones]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2001, no. 8, pp. 27-29.
32. Korolev M.S., Korolev S.S. Otsenka effektivnosti i optimizatsiia sistem podderzhaniia plastovogo davleniia [Evaluation of the effectiveness and optimization of reservoir pressure maintenance systems]. *Territoriia Neftegaz*, 2009, no. 8, pp. 74-78.
33. Korolev M.S. Razrabotka i issledovanie tekhniko-tekhnologicheskikh parametrov regulirovaniia sistem podderzhaniia plastovogo davleniia [Development and research of technical and technological parameters for regulating reservoir pressure maintenance systems]. Abstract of Ph. D. thesis. Tiumen', 2008, 24 p.
34. Poliakova N.I., Maksimova Iu.A., Ziatikov P.N. Kompleksnyi podkhod k primeneniiu metodov analiza effektivnosti sistemy zavodneniia neftianykh plastov [Integrated approach to application of methods for analyzing the effectiveness of the oil reservoir flooding system]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 91-98. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2853
35. Rakhmaev L.G., Nizaev R.Kh., Gutorov Iu.A. O vozmozhnosti optimizatsii rezhima zakachki nagnetatel'nykh skvazhin v usloviiakh Vostochno-Leninogorskoi ploshchadi Romashkinskogo mestorozhdeniia [Optimization of water injection schedule in Romashkinskoye oilfield, East-Leninogorskaya area]. *Neftianaia provintsiia*, 2016, no. 3, pp. 61-86, available at: https://2d5385f0-870f-473a-b271-aa454e83c7c1.filesusr.com/ugd/2e67f9_7c99c03d48814383b1bb80d26d37d3da.pdf (accessed 20 June 2025). DOI: 10.25689/NP.2016.3.61-86
36. Fattakhov I.G. et al. Analiz effektivnosti zavodneniia mestorozhdenii na pozdnei stadii razrabotki [Analysis of waterflooding performance in mature fields]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2023, no. 8, pp. 42-46. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-8-42-46
37. Guliaev D.N. et al. Analiz vzaimovliianiia skvazhin po rezul'tatam monitoringa na osnove sektornogo modelirovaniia [Wells interference determination by permanent down-hole monitoring on base of sector modeling]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2012, no. 5, pp. 82-85.
38. Stepanov S.V. et al. Problematika otsenki vzaimovliianiia dobyvaiushchikh i nagnetatel'nykh skvazhin na osnove matematicheskogo modelirovaniia [Considerations on Mathematical Modeling of Producer-Injector Interference]. *Vestnik Tiumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 146-164. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-146-164

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.