

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.270-291>

EDN RIPEVZ

УДК 622.276.5:556.343

Классификация и обзор методов определения причин обводнения скважин

Рыжов Р.В.

ГБОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет» - «Высшая школа нефти», Альметьевск, Россия

Classification and review of methods for determination of the causes of well flooding

R. V. Ryzhov

Almetyevsk State Technological University – Higher Petroleum School, Almetyevsk, Russia

E-mail: rom.ryzhoff2011@yandex.ru

Аннотация. В работе проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, освещающих проблему определения причин обводнения скважин. Исследованы основные классификации факторов, влияющих на увеличение доли попутно добываемой воды. Поиск материалов произведен в электронных базах литературы: отечественный источник – научная электронная библиотека elibrary.ru, зарубежные источники – базы научных знаний researchgate.net и onepetro.org. Глубина поиска составила 25 лет. В процессе анализа повышенное внимание уделялось аналитическим подходам и методам, позволяющим по промысловым и косвенным данным определять наиболее вероятные причины обводнения скважин. В результате основными подходами являются разнообразные вариации построения и анализа графиков Чена, Холла и методы машинного обучения (хорошо отражено в наиболее свежих публикациях). Также широко представлен комплексный подход, объединяющий статистико-аналитические методы и геолого-гидродинамическое моделирование.

Ключевые слова: *обводненность, дебит воды, причины обводнения, машинное обучение, конусообразование, высокопроницаемые каналы, заколонная циркуляция, график Чена, график Холла, анализ промысловых данных, геолого-гидродинамическая модель, добывающая скважина, нагнетательная скважина*

Для цитирования: Рыжов Р.В. Классификация и обзор методов определения причин обводнения скважин // Нефтяная провинция.-2024.-№3(39).-С. 270-291. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.270-291>. - EDN RIPEVZ

Abstract. The paper presents an analysis of Russian and foreign literary sources covering the problem of determining the causes of well flooding. The main classifications of factors causing the increase in water production were studied. Literature search was conducted in electronic literature databases: Russian scientific electronic library elibrary.ru and foreign scientific knowledge bases researchgate.net and onepetro.org. Literature search date was limited to the recent 25 years. The analysis was conducted with increased focus on analytical approaches and methods enabling determination of the most likely causes of well flooding using field data and indirect evidence. The analysis revealed the main current approaches based on numerous variations of the construction and analysis of Chen and Hall plots and machine learning methods (highlighted in the latest publications). An integrated approach combining statistical-analytical methods and geological and reservoir simulation modeling is also widely presented.

Key words: *water cut, water flow rate, causes of flooding, machine learning, coning, high-permeability channels, cross flows behind the casing, Chen plot, Hall plot, field data analysis, geological and reservoir simulation model, production well, injection well*

For citation: R.V. Ryzhov Klassifikatsiya i obzor metodov opredeleniya prichin obvodneniya skvazhin [Classification and review of methods for determination of the causes of well flooding]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(39), 2024. pp. 270-291. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.270-291>. EDN RIPEVZ (in Russian)

Разработка нефтяных месторождений во всем мире ведется уже более 100 лет, и в наше время мы все чаще сталкиваемся с проблемами, характерными для эксплуатации месторождений на поздней стадии выработки. Основная задача инженера в глобальном смысле воспроизведение и анализ фильтрационных потоков, протекающих в пласте, понимание работы объекта как целостной системы и, как следствие, локализации остаточных запасов углеводородов. Данный аспект особо важен для принятия технологически и экономически эффективных решений (комплекс геолого-технологических мероприятий (ГТМ)) и оперативного контроля в процессе сопровождения разработки нефтегазового актива.

Одной из частных задач, вытекающих из указанной проблематики, является определение причин обводнения скважин. Особенно актуально это

при разработке больших, старых месторождений со сложным геологическим строением и развитой системой поддержания пластового давления (ППД). Спектр применяемых инструментов включает в себя комплекс промыслово-геофизических исследований (ПГИ); анализ состояния разработки месторождения, ремонтов по скважинам; аналитические методы обработки промысловых данных; геолого-гидродинамическое моделирование (ГГДМ).

В настоящее время моделирование широко применяется инженерами-нефтяниками, на основе ГГДМ осуществляют подсчет запасов и составление проектно-технологической документации, производят планирование ГТМ и прогнозирование показателей разработки месторождений углеводородов. Для инженера-гидродинамика очень важна информация об обводнении скважин в процессе построения и настройки ГГДМ для получения достоверных данных о локализации остаточных запасов углеводородов и качественной ГГДМ (инструмента) с высокой прогностической способностью. Также с точки зрения гидродинамики анализ причин обводнения скважин является дополнительным инструментом верификации исходных промысловых данных. Актуально для месторождений с большой историей добычи, где начальные данные зафиксированы еще на бумажных носителях (эксплуатационные карточки) и велика вероятность ошибок, неточностей, потери данных и т.д. Целью работы является анализ применяемых методов для определения факторов обводнения скважин, выделения узких мест и направлений для дальнейшей исследовательской деятельности.

Классификация причин прорыва воды

На поздних стадиях разработки месторождений нефти вода неизбежно присутствует в продукции добывающих скважин, будь то естественный пластовый флюид либо вносимый системой ППД агент. В работе [1]

Б. Бейли и соавторы всю попутно добываемую воду на верхнем уровне классификации с экономической точки зрения разделяют на «хорошую» и «плохую». «Хорошая» – это вода, добываемая из скважины в объеме меньше рентабельного предела значения водонефтяного фактора (ВНФ). «Плохая» вода – это такой объем, при котором теряется экономический смысл эксплуатировать скважину (слишком большие затраты на добычу, переработку, утилизацию лишней воды). Также в литературе часто встречается классификация воды по технологическому принципу: «полезная», участвующая в вытеснении нефти, и «бесполезная», не участвующая в процессе вытеснения.

В совокупности и зарубежные авторы [1], и отечественные специалисты [2–4] выделяют 9 основных причин «плохой» воды:

- 1) негерметичность эксплуатационной колонны;
- 2) заколонная циркуляция (ЗКЦ) (перетоки из выше/нижележащих водоносных пластов) ввиду плохого состояния цементной крепи колонны;
- 3) движение водонефтяного контакта (ВНК) (поднятие);
- 4) естественные либо техногенные трещины, связывающие добывающие и нагнетательные скважины;
- 5) трещины, простирающиеся по латерали и связывающие нефтеносные пласты с водоносными;
- 6) конусообразование (локальный подъем ВНК в районе скважины) – причина тесно связана с близким расположением ВНК к перфорированному интервалу и режимом работы скважины;
- 7) неоднородность геологического строения и, как следствие, прорыв воды по наиболее проницаемым пропласткам от нагнетательных скважин или от водоносной контурной части залежи к добывающим скважинам;
- 8) неоднородное распределение проницаемости по площади, что приводит к низкому коэффициенту охвата и наличию обводненных и не затронутых вытеснением зон;

9) гравитационное разделение флюида – в пластах большой толщины с высокой вертикальной анизотропией закачиваемая или пластовая вода при движении к добывающей скважине мигрирует в нижнюю часть залежи, не вытесняя при этом нефть из верхней части залежи.

Опираясь на результаты исследований [1, 2], все причины «плохой» воды в продукции добывающих скважин можно разделить на две основные группы: геологические и технологические факторы (Рис.1). Стоит отметить, что такие причины как трещины между нагнетательными и добывающими скважинами и конусообразование нельзя однозначно определить к одной из двух групп. Это связано с тем, что в основе их проявления лежит геологическая и технологическая природа в совокупности.

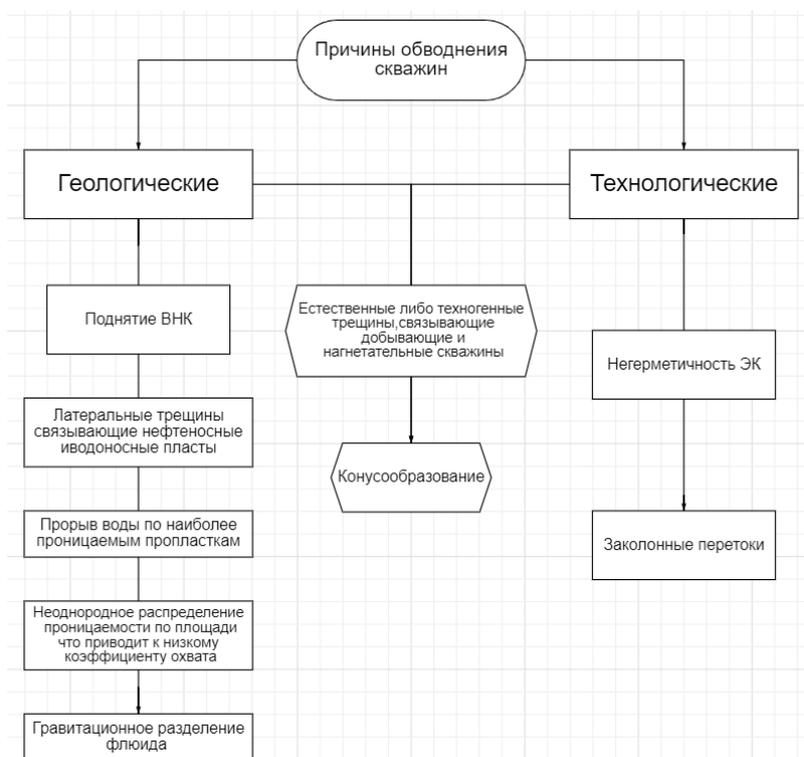


Рис. 1. Классификация факторов обводнения скважин

Описание методов определения причин обводнения скважин

Для начала отметим работы, основанные больше на преданализе промысловых и геофизических данных, позволяющие выявить причины обводнения скважин и предлагающие решения проблемы. В работе [5] Ю.Я. Большаков и соавторы обозначают гидрофобность коллектора как основную

причину быстрого обводнения скважин даже при отсутствии системы ППД и высокой начальной нефтенасыщенности коллектора. В таком типе коллекторов воде энергетически эффективнее занимать большие поры и пустоты в коллекторе, что приводит к быстрому обводнению. В статье [6] представлена интересная причина обводнения (относится к технологическим факторам): при повторном вскрытии направление образованных каналов, как правило, перпендикулярно перфоратору. В наклонно-направленных скважинах со значительным углом кривизны и близким расположении ВНК это может привести к приобщению водонасыщенной части пласта и преждевременному обводнению.

Р.Н. Абдуллин и А.Р. Рахматуллиной [7] рассмотрен метод выявления причин быстрого обводнения скважин в карбонатных коллекторах при помощи комплекса геофизического исследования скважин (ГИС), а в частности таких, как кросс-дипольный акустический каротаж, акустический сканер, электрический микроимиджер. Комплексная интерпретация позволила выявить конфигурацию трещиноватости коллектора и связь с нижележащими водоносными горизонтами.

Работа [8] посвящена решению проблемы конусообразования. Авторы произвели моделирование и оценили эффективность технологии тройной внутрискважинной перекачки в программном комплексе Eclipse. Осуществляются перфорация над ВНК и две перфорации под ВНК (верхняя и нижняя), далее из перфорации в нефтенасыщенной части производят отбор нефти, из верхней перфорации под ВНК отбирают воду и закачивают её в нижний интервал, тем самым поддерживают энергетику пласта и предотвращают образование конуса.

Далее рассмотрены в основном аналитические методы определения причин обводнения скважин как наиболее интересные для инженера-гидродинамика в контексте построения моделей пласта. А.А. Кислицын и коллек-

тив авторов [9], определив причину обводнения на рассматриваемом объекте (подошвенная вода), представили свежий подход в построении куба песчаности с использованием нейронных сетей (в отличие от стандартного стохастического подхода), добившись тем самым более качественной геологической модели и прогнозирования динамики обводнения скважин объекта, хорошо коррелирующих с историей.

Определение причин обводненности скважин может выступать как самостоятельная задача, так и быть одним из этапов комплексного анализа и оптимизации объекта разработки. Данный подход представлен в работах зарубежных авторов [10–12], где используются графики Чена, Холла для определения качественной и количественной взаимосвязи «добывающая – нагнетательная скважина», «добывающая скважина – контур питания», «нагнетательная скважина – пласт». В труде К. Вубе [11] основной упор сделан на предварительный анализ разработки месторождения и корректировку петрофизической и геологической моделей перед построением гидродинамической модели. М. Mendoza и соавторы [12] описали концепцию комплексного проекта развития актива. Представлен процесс реанимации зрелого месторождения Эквадора от первоначального анализа разработки до построения полноценной ГГДМ, подбора ГТМ и оптимизации работы актива в целом с учетом экономической целесообразности.

Аналогично можно отметить работы [13, 14], где графоаналитический метод Чена выступает отдельным этапом работы. В статье [13] авторы используют ВНФ в совокупности с геолого-промысловым анализом для подбора перспективного участка для зарезки бокового ствола и подбора скважин – кандидатов на дострел. По результатам анализа рекомендованы порядок и интервалы вскрытия, получены дебиты нефти, в 2 раза превышающие план. В. Utomo с коллегами [14] приводит пример подбора кандидата и проведения водоизоляционных работ (ВИР) на горизонтальной скважине с анализом в реальном времени – в общих чертах провели ПГИ по определению

насыщения соседних скважин на участке для определения текущего уровня ВНК, сопоставили с конструкцией открытого ствола и геологией, графоаналитическим методом Чена подтвердили конусообразование. Далее описывается технология зональных ВИР.

Наиболее доступный и объемный источник данных в процессе разработки – это промысловые данные о добыче и закачке, пластовых и забойных давлениях. В трудах [15–19] отечественными и зарубежными авторами представлены возможности применения методов математической статистики для обработки промысловых данных с целью получения информации о возможных причинах обводнения скважин, оценки взаимосвязи скважин и непроизводительной закачки нагнетательных скважин. Д.А. Кудряшов [15] использовал критерий Т-студента для определения причин обводнения скважин – кандидатов на ВИР. Критерий Т считали для каждого элемента набора параметров (расстояние до ВНК, толщина пласта, пористость, проницаемость и т.д.) – из данного набора определяли статистически значимые параметры. Далее, используя значимые параметры, скважины распределяли по двум группам причин обводнения: прорыв законтурной воды и прорыв нагнетаемой воды по высокопроницаемому пропластку.

Работы Y. Wang, Y. He и соавторов [17, 18] представляют собой определение связи нагнетательных и добывающих скважин, ориентации естественной трещиноватости либо трещин автоГРП (гидроразрыв пласта), используются графики Холла, что впоследствии применяется для оптимизации системы ППД. В данных трудах авторы используют и дорабатывают статистический метод множественной линейной регрессии для расчета коэффициента межскважинной связности, предложенный A. Albertoni и L.W. Lake [19].

Наиболее частым подходом для определения причин обводнения скважин являются различные вариации анализа диагностических графиче-

ков ВНФ. Данное направление основано на методе, предложенном в работе [20] К.S. Chan, где автор строит зависимость ВНФ и производной ВНФ от времени в логарифмических координатах. По характеру получаемой кривой можно определить наиболее вероятную причину обводнения скважины. Применение и развитие идей К.S. Chan представлено в работах [21–23], на практике примерно в 60 % случаев происходит совпадение причин обводнения, выявленных подобным графоаналитическим методом, с реальными. В статье [22] подход использован для горизонтальных скважин, но в сущности практически не отличается от вертикальных, представлены типовые примеры графиков ВНФ для трех основных причин обводнения: конусообразование, влияние закачки и ЗКЦ. Э.Т. Бабаев [23] доказывает, что анализ колебаний ВНФ может дать ключи к определению причин обводнения. Проблемы, связанные с притоком воды, например, из-за конусообразования или наличия единичной трещины, пересекающей нижележащий водоносный пласт, приведут к более низким значениям ВНФ на ограниченном дебите либо сразу после пуска скважины в эксплуатацию. И наоборот, система трещин или разлом, проходящие через перекрывающий водоносный пласт, приведут к обратному эффекту.

Зарубежные авторы в труде [24] приводят практический пример определения характера обводнения с применением графиков Чена и расчета предельного безводного дебита для скважины, обводняемой конусообразованием. Аналогичный, но более раскрытый и дополненный подход представил В.А. Лушпеев и коллектив соавторов в статье [25].

В работе рассчитывают предельный безводный дебит нефтяной скважины по формулам (1)–(3):

$$Q_1 = Q_0 q(\rho_0 \bar{h}), \quad (1)$$

$$Q_0 = \frac{2\pi K h_0}{\mu} \Delta \rho g, \quad (2)$$

$$\Delta \rho = \rho_B - \rho_H, \quad (3)$$

где $q(\rho_0 \hbar)$ – безразмерный предельный дебит, определяемый по графику (Рис. 2); Q_0 – потенциальный дебит; K – проницаемость; μ – вязкость; ρ_B, ρ_H – плотность воды, нефти; h_0 – мощность нефтенасыщенной части пласта; \hbar – отношение вскрытой нефтяной толщи, к общей толще нефтеносности; ρ_0 – параметр размещения.

Параметр размещения определяется по формуле:

$$\rho_0 = \frac{R_0}{\chi * h_0} \quad (4)$$

где R_0 – контур питания; χ – коэффициент анизотропии; h_0 – мощность нефтенасыщенной части пласта.

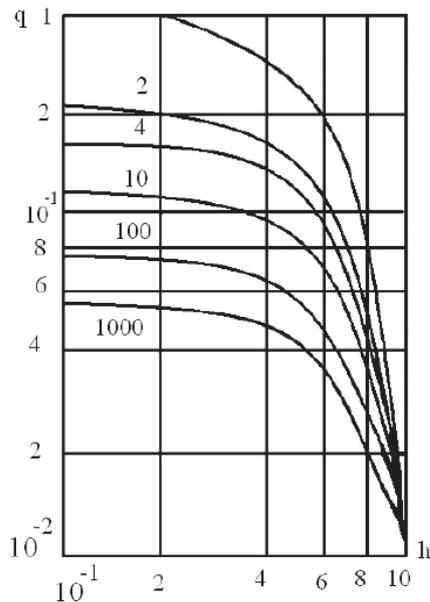


Рис. 2. Зависимость безразмерного предельного дебита от относительного вскрытия \hbar при различном значении параметра ρ_0 (цифры у кривых)

Время прорыва подошвенной воды рассчитывают исходя из количества отобранной нефти до момента прорыва конуса воды к скважине, по формуле Маскета:

$$Q = \alpha * m * h_0^3 * \frac{K_r * D}{K_B}, \quad (5)$$

где α – произведение коэффициента нефтеотдачи блока на коэффициент усадки нефти.

Коэффициент усадки нефти определяется по формуле:

$$U = \frac{b-1}{b} * 100, \quad (6)$$

b – объемный коэффициент.

D – поправочный коэффициент, вычисляется по формуле:

$$D = \frac{100(h_0 - d)}{h_0}, \quad (7)$$

h_0 - нефтенасыщенная толщина пласта, м.; d - глубина вскрытия нефтенасыщенной части пласта, м.

Далее определяют теоретическое время (в сутках) прорыва воды к скважине:

$$T = Q/q, \quad (8)$$

где Q – количество отобранной нефти до того, как вода прорвется к скважине, м³; q – средний дебит скважины м³/сут (Маскет, 1953).

Сопоставляя теоретически рассчитанные предельный дебит и время прорыва воды с фактическими значениями по скважине, можно определить причину обводнения скважины: поднятие конуса либо прорыв воды от нагнетательной скважины. Если фактическое время безводной работы скважины больше теоретически определенного времени, причина – конусообразование, если меньше – влияние нагнетательной скважины.

Последние два десятилетия быстрыми темпами развивается сфера программирования и искусственного интеллекта. Наблюдается ее широкое внедрение в науку и другие области деятельности. Применение возможностей программирования для решения задач определения причин обводнения скважин представлено в работах [26–30]. В трудах [26–29] описана методо-

логия оценки обводнения скважин, основанная на построении и анализе графиков Чена, создан программный продукт, который обрабатывает промышленные данные и статистическими методами сравнивает подобие реальных кривых типовым кривым. В результате можно определить вероятность обводнения от одной из основных причин в процентах. Программа позволяет обрабатывать большие объемы данных за короткое время, что актуально для крупных месторождений со значительным числом скважин.

Интересный подход представлен в статье [30], С.А. Garcia, А. Mukhanov, и Н. Torres используют алгоритмы машинного обучения для анализа графиков Чена. В качестве основных параметров для обучения модели машинного обучения используется угол наклона функций ВНФ и производной ВНФ. Рассмотрены несколько моделей, наиболее точной оказалась «модель ближайшего соседа». Также определены границы ее применимости.

Отечественные авторы [29, 31, 32] изучили возможности метода, предложенного K.S. Chan с использованием ГГДМ. А.С. Устюгов и соавторы [29] создали несколько тестовых ГГДМ с основными причинами обводнения скважин и построили типовые наборы кривых ВНФ по методу Чена. Далее анализировались промышленные данные по реальным скважинам и сравнивались с типовыми кривыми, таким образом определяли причину появления воды в скважине. Также был проведен «слепой» тест, когда через алгоритм пропускали скважины с известными причинами обводнения и сравнивали результаты, полученные программой с реальными причинами. Практические аспекты моделирования конусообразования представлены коллегами в статье [32]. Рассмотрены такие подходы, как несоседние соединения, дополнительные перфорации, искусственные трещины, анизотропия проницаемости по латерали, измельчение сетки в зоне конуса. Оценены прогностическая способность и время расчета каждого

подхода. Пришли к выводу, что лучшие результаты показывает подход с измельчением сетки, но он значительно увеличивает время расчета, неплохо показывает себя метод дополнительных перфораций, остальные имеют существенные недостатки.

Д.А. Метт, Е.В. Петрова [31] на тестовой модели изучали влияние анизотропии и проницаемости высокопроницаемого канала на форму графиков ВНФ. Особая ценность работы в том, что определены границы применимости метода Чена. Определение прорыва воды по высокопроницаемому каналу с приемлемой точностью возможно при значении обводненности более 10 % и соотношении средней проницаемости пласта к проницаемости канала менее чем 0,01. При комплексной причине – конусообразовании с прорывом воды по высокопроницаемому каналу – образование конуса скрывает прорыв воды по каналу. В случае вертикальной анизотропии больше 1 определить образование конуса возможно только при значении обводненности более 60 %, в обратном случае – при обводненности до 60 %.

Как выяснили, одной из наиболее частых причин обводнения скважин является прорыв воды от нагнетательных скважин, поэтому важно знать характер взаимодействия цепочки «нагнетательная – добывающая скважины», оценивать объемы целевой и нецелевой закачки и направления воздействия. Соответственно, работа нагнетательной скважины и системы ППД в целом является важным аспектом задачи определения причин обводнения добывающего фонда. На практике широко используют сопоставление и анализ промысловых данных по добыче и закачке скважин в совокупности с графиками Холла (для оценки работы нагнетательных скважин). В работах [33–35] В. Izgec, М.Р. Gogri и др. используют вариации графиков Холла для определения давления и момента образования автоГРП, оценки предельного объема закачки в пласт. В общих чертах график Холла представляет собой зависимость накопленного произведения репрессии на время работы от накопленной закачки по скважине, в обычных условиях – линейную

функцию. Отклонение графика от линейности в ту или иную сторону указывает либо о засорении призабойной зоны пласта/насыщении пласта, либо о разрыве пласта и образовании техногенных трещин автоГРП. Статьи [33, 34] интересны усовершенствованным подходом, авторы дополнительно использовали производную графика Холла. Наложив производную на основной график, можно определить объем закачки, который может принять пласт без разрыва. Следовательно, можно оценить момент разрыва пласта и примерные объемы непроизводительной закачки. Данная информация полезна в процессе гидродинамического моделирования (воспроизведение динамики исторической энергетики объекта).

А.В. Климов-Каяниди с коллегами [35] представил практический пример определения давления образования трещин автоГРП, характерного для объекта. Также оценили направление влияния нагнетательных скважин при работе на давлениях выше и ниже критического (выявленного раньше). Авторы, имея информацию о давлениях разрыва и управляя приемистостью, регулируют техногенную трещиноватость объекта и по участкам управляют системой ППД.

А.Н. Куликов с соавторами [36] провел глубокий анализ комплекса графоаналитических методов диагностики водопритоков в скважинах, провел численный эксперимент на гидродинамических моделях и выявил характерные особенности обводнения нефтяных скважин:

1) ЗКЦ в скважинах образуется главным образом в первые месяцы эксплуатации, т.е. до прорыва к ним контурных вод или ВНФ;

2) заметное превышение обводненности продукции скважины с ЗКЦ в первые месяцы ее эксплуатации над приемлемым значением, соответствующим начальной водонасыщенности призабойной зоны пласта;

3) постоянство значений логарифма ВНФ продукции скважины, обводняемой посредством ЗКЦ, связанное с постоянством давления в обводняющем пласте;

4) отрицательная корреляция динамики дебита жидкости и обводненности продукции скважины за счет ЗКЦ.

На основании полученных результатов автор разработал корреляционный метод диагностики водопритокков, который позволяет сравнительным анализом динамики эксплуатационных показателей выделять скважины, обводняющиеся посредством ЗКЦ, и скважины, обводняющиеся закачиваемой водой. Данный подход реализован в программе, позволяющей быстро находить проблемные скважины среди всего добывающего фонда залежи [37]. Опыт показывает высокую сходимость результатов применения данной методики с результатами ПГИ.

Интересный комплексный подход определения взаимосвязи между нагнетательными и добывающими скважинами участка и определения причины обводнения добывающих скважин на основе статистического анализа представлен в работе [38]. Для оценки взаимовлияния используются вычисление и оценка комбинации коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, которая определяет степень тесноты связи временных рядов данных: приемистости нагнетательных скважин попарно с данными по дебиту жидкости, нефти и забойному давлению добывающих скважин. Для определения причин обводнения разработан модуль автоматического построения и обработки графиков Чена. На кривых выделяют продолжительные участки роста производной ВНФ, которые являются ключевыми участками роста обводненности. Каждый такой участок разбивается на подучастки с характерным темпом падения или роста. Далее на основе угла наклона устанавливается вид причины обводнения на добывающей скважине в рассматриваемый период. Обе методики прошли верификацию на промысловых данных и показали высокую достоверность. Модуль обработки графиков ВНФ позволяет провести экспресс-оценку фонда большого объема и выделить кандидаты на проведение ремонтно-изоляционных работ. Вместо подробного анализа каждого отдельного участка предложенная гибридная методика

дает возможность сформировать дополнительный инструмент для анализа и оптимизации системы разработки участка и позволяет сократить трудозатраты на исследование промысловых данных.

Выводы

1. Сгруппированы и классифицированы основные факторы обводнения добывающих скважин.

2. Наиболее достоверные результаты по причинам обводнения и качеству связи «нагнетательная – добывающая скважины» дают промыслово-геофизические, гидродинамические и трассерные исследования.

3. Среди спектра графоаналитических методов анализа исторических промысловых данных широкое распространение получили различные вариации и модификации подходов, предложенных К. Chan, Hall.

4. Каждый из графоаналитических методов имеет свои недостатки и границы применимости, поэтому есть потенциал для исследований, поиска новых подходов, улучшения существующих методов в данной области, направленной на оценку факторов обводнения добывающих скважин, также недостатки графоаналитических методов компенсируются комплексированием с гидродинамическим моделированием.

Список литературы

1. Диагностика и ограничение водопритоков / Б. Бейли [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2001. – № 1. – С. 44–67.
2. Фаттахов И.Г. Методика идентификации путей обводнения нефтяных скважин. – Текст : электронный // Нефтегазовое дело : электрон. науч. журн. – 2011. – № 3. – С. 154-159. – URL: <http://ogbus.ru/article/view/metodika-identifikacii-putej-obvodneniya-neftyanyx-skvazhin/23988> (дата обращения: 22.03.2024).
3. Риднова Т.В. Оценка причин обводнения скважин на Береговом месторождении // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире : сб. материалов XI-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Мирный, 7-8 апр. 2022 г. – М.: Спутник, 2022. – С. 356-357.
4. Диагностика источников водопритока и перспективы технологий ограничения прорыва воды в скважины / И.И. Краснов [и др.] // Нефть и газ: опыт и инновации. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 20-34.

5. О причинах быстрого обводнения добывающих скважин на Западно-Кочевненском месторождении / Ю.Я. Большаков, Е.Ю. Неелова, К.В. Салова // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., 12 нояб. 2020 г., г. Альметьевск. – Альметьевск: АГНИ, 2020. – Т 1. – С. 43-47.
6. Возможные причины преждевременного обводнения наклонных скважин с высокими значениями зенитных углов / В.П. Овчинников [и др.] // Бурение и нефть. – 2018. – № 10. – С. 56-59.
7. Абдуллин Р.Н., Рахматулина А.Р. Пример практического применения информации о трещиноватости по данным комплекса ГИС и высокотехнологических методов // Георесурсы. – Т. 20, № 3, ч. 2. – С. 261-266. – DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.261-266>.
8. Jin L., Wojtanowicz, A.K. Performance Analysis of Wells With Downhole Water Loop Installation for Water Coning Control // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2010. – № 6. – P. 38-45. – DOI: 10.2118/138402-pa.
9. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования динамики обводнения горизонтальных скважин / А.А. Кислицын [и др.] // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2019. – Т. 5, № 4 (20). – С. 160-180. – DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-160-180.
10. Qazvini Firouz A. [et al.] Practical Reservoir-Management Strategy to Optimize Waterflooded Pools with Minimum Capital Used // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2019. – Vol. 22, № 4. – SPE-189730-PA. – DOI:10.2118/189730-pa.
11. Bybee K. Understanding First, Simulation Later // Journal of Petroleum Technology. – 2011. – Vol. 63, № 1. – P. 59-60. – DOI:10.2118/0111-0059-jpt.
12. From Concept to Execution: A Successful Integrated Exploitation Philosophy / M. Mendoza [et al.] // SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, Sep 2019. – SPE-196734-MS. – DOI:10.2118/196734-ms.
13. Sweep Efficiency Increasing of Fractured Oil-Wet Reservoirs: Case Study of Central Khoreyver Uplift Fields / E.V. Yudin [et al.] // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Oct 15-17, 2018, Moscow, Russia. – SPE-191579-18RPTC-MS. – DOI:10.2118/191579-18rptc-ms.
14. Innovative Water Shut Off Solution Combining Real Time Downhole Measurement and Analysis with Zonal Isolation Technologies for Horizontal Open Hole Producer in Ratawi Field - A Case History from Partitioned Zone / B. Utomo [et al.] // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Sep 20-22, 2011, Jakarta, Indonesia. – SPE-145901-MS. – DOI:10.2118/145901-ms.
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 ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 26-36. – DOI 10.15593/2224-9923/2018.1.3.
16. Segun-Oki H., Eli A. Material Balance Methods for Correcting Misallocation of Injected Water: Kadara field Case Study. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Aug 5-7, 2014, Lagos, Nigeria. – SPE-172418-MS. – DOI: 10.2118/172418-ms.
17. A Comprehensive Work Flow To Characterize Waterflood-Induced Fractures by Integrating Real-Time Monitoring, Formation Test, and Dynamic Production Analysis Applied to Changqing Oil Field, China / Y. Wang [et al.] // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2022. – Vol. 22, Issue 02. – P. 692–708. – DOI: 10.2118/191370-pa.

18. Waterflood Direction and Front Characterization With Four-Step Work Flow: A Case Study in Changqing Oil Field, China / Y. He [et al.] // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2017. – Vol. 20, № 3. – P. 708-725. – DOI:10.2118/178053-pa.
19. Albertoni A., Lake L.W. Inferring Interwell Connectivity Only From Well-Rate Fluctuations in Waterfloods // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2003. – Vol. 6, № 1. – P. 6–16. – DOI:10.2118/83381-pa.
20. Chan K.S. Water Control Diagnostic Plots // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Oct 22-25, 1995, Dallas, Texas. – SPE-30775-MS. – DOI:10.2118/30775-ms.
21. Остапчук Д.А. Определение причин обводнения скважин с помощью графиков ВНФ // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации): материалы Восьмой Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Муравленко Виктора Ивановича, Тюмень, 24 дек. 2012 г. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 30-31.
22. Остапчук Д.А., Синцов И.А. Усовершенствованный диагностический метод определения причин обводнения скважин // Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегион. науч.-техн. конф., Ухта, 13-14 нояб. 2014 г. – Ухта: УГТУ, 2015. – С. 115-122.
23. Бабаев Э.Т. Обводнение нефтяных скважин // Перспективы развития науки и образования: материалы Междунар. (заочной) науч.-практ. конф., Нефтекамск, 31 марта 2021 г. – Нефтекамск: НИЦ «Мир науки», 2021. – С. 75-78.
24. Mekunye Francis, Paul Osaze Ogbeide Application of Chan Plot in Water Control Diagnostics for Field Optimization: Water/Gas Coning and Cusping // NIPES Journal of Science and Technology Research. – 2019. – Vol. 3, № 4. – P. 227-232. – DOI:10.37933/nipes/3.4.2021.23.
25. Методика определения причины обводнения скважин / Лушпеев В.А. [и др.] // Георесурсы. – 2013. – № 2. – С. 44-47.
26. Леонтьев Д.С., Клещенко И.И. Графическая диагностика причин обводнения нефтяных скважин / Д. С. Леонтьев, // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса : материалы V регион. науч.-практ. конф. обучающихся ВО, аспирантов и ученых, Тюмень, 28 апр. 2015 г. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2015 – С. 119-127.
27. Леонтьев Д.С., Клещенко И.И., Долгих Е.Ф. Разработка программного продукта «Диагностика причин обводнения нефтяных и газовых скважин» // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича, Тюмень, 15-16 окт. 2015 г. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – Т. II. – С. 102-112.
28. Леонтьев Д.С., Клещенко И.И. Применение принципа анализа риском при диагностике причин обводнения нефтяных и газовых скважин // Техника и технология строительства и ремонта нефтяных и газовых скважин: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Тюмень, 16 дек. 2015 г. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 178-182.
29. Устюгов А.С., Сутягин В.В., Галиуллин М.М. Экспресс-диагностика определения причин обводнения скважин на основе анализа промысловых данных // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. – № 8. – С. 4-9.
30. Garcia C.A., Mukhanov A., Torre, H. Chan Plot Signature Identification as a Practical Machine Learning Classification Problem // International Petroleum Technology Conference, March 26-28, 2019, Beijing, China. – DOI:10.2523/iptc-19143-ms.
31. Метт Д.А., Петрова Е.В. Определение источников обводнения добывающих скважин на основе диагностических графиков Чена. Границы применимости подхода // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 7. – С. 65-70.

32. Ilya B., Diana S. Practical Aspects of Modeling of Water Coning in Carbonate Reservoirs // SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition, Nov. 4-6, 2015, Baku, Azerbaijan. – SPE-177396-MS. – DOI:10.2118/177396-ms.
33. Izgec B., Kabir C.S. Real-Time Performance Analysis of Water-Injection Wells // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2009. – Vol. 12, № 1. – P. 116-123. – DOI:10.2118/109876-pa.
34. Prognosis for Safe Water-Disposal-Well Operations and Practices That Are Based on Reservoir Flow Modeling and Real-Time Performance Analysis / M.P. Gogri [et al.] // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2018. – Vol. 21, № 3. – P. 576-592. – SPE-187083-PA. – DOI:10.2118/187083-pa.
35. Авто-ГРП на нагнетательных скважинах в низкопроницаемых коллекторах ачимовской толщи / А.В. Климов-Каяниди [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 2. – С. 39-43.
36. Куликов А.Н., Магзянов И.Р., Штинов В.А. Графоаналитическая методика диагностики обводнения нефтяных скважин // Нефтепромышленное дело. – 2012. – № 8. – С. 11-17.
37. Куликов, А.Н. Методика выбора скважин для проведения работ по ограничению водопритокков и восстановлению добывающего фонда // Нефтепромышленное дело. – 2012. – № 7. – С. 19-23.
38. Повышение эффективности разработки с использованием и автоматизацией аналитических методов анализа взаимовлияния фонда и характера обводнения / П. М. Дрофа [и др.] // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2023. – Т. 8, № 3. – С. 127-139. – DOI 10.51890/2587-7399-2023-8-3-127-139.

References

1. Beyli B., Krabtri M., Tayri D. *Diagnostika i ogranichenie vodopritokkov* [Diagnostic and water shutoff]. Neftegazovoe Obzrenie [Oil and Gas Review]. 2001, No. 1, pp. 44—67. (in Russian)
2. Fattakhov I. G. *Metodika identifikatsii putey obvodneniya neftyanykh skvazhin* [Method for identification of water encroachment pathways to oil production wells]. Neftegazovoye Delo [Petroleum Engineering]. 2011, No. 3, pp. 154-159. (in Russian)
3. Ridnova T.V., Eliseeva M.I. *Otsenka prichin obvodneniya skvazhin na beregovom mestorozhdenii* [Evaluation of the causes for well flooding in an onshore field]. Mirny: Sputnik+ Publ., 2022, pp. 356-357. (in Russian)
4. Krasnov I.I., Vaganov E.V., Inyakina E.I. *Diagnostika istochnikov vodopritoka i pespektivy tekhnologii ogranicheniya proryva vody v skvazhinny* [Diagnostics of water inflow sources and prospects for water shutoff technologies]. Neft i Gaz: Opyt i Innovatsii [Petroleum and gas: Experience and Innovation]. 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 20-34. (in Russian)
5. Bolshakov Yu.Ya., Neelova E.Yu., Salova K.V. *O prichinakh bystrogo obvodneniya dobyvayushchikh skvazhin na Zapadno-Kochevnskoye mestorozhdenii* [Causes of rapid flooding of production wells of Zapadno-Kochevnskoye field]. Almeteyevsk: Almeteyevsk State Oil Institute, 2020, pp. 43-47, EDN ANHHLC. (in Russian)
6. Ovchinnikov V.P., Saltykov V.V., Rozhkova O.V. Possible causes of premature flooding of inclined wells with high zenith angles. Burenie i Neft [Drilling and Oil]. 2018, No. 10, pp. 56-59, EDN YBDPFJ. (in Russian)
7. Abdullin R.N., Rakhmatullina A.R. An example of practical application of information on fracturing according to the well logging data complex and high-tech methods. Georesursy [Georesources], 20(3), Part 2, pp. 261-266. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.261-266>. (in Russian)

8. Jin, L., & Wojtanowicz, A. K. (2010). Performance Analysis of Wells with Downhole Water Loop Installation for Water Coning Control. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49(06), 38–45. doi:10.2118/138402-pa. (in English)
9. Kislitsyn A.A., Kuznetsov S.V., Podnebesnykh A.A., Granovsky A.M. Using neural networks for predicting the dynamics of water cut of horizontal wells. *Vestnik Tyumenskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Fiziko-matematicheskoe Modelirovanie. Neft, Gaz, Energetika [Bulletin of Tyumen State University. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy]*. 2019, Vol. 5, No. 4 (20), pp. 160-180. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-160-180. (in Russian)
10. Qazvini Firouz, A., Nwangene, M., Hollinger, B., Kenny, M., & Vianzon, D. (2019). Practical Reservoir-Management Strategy to Optimize Waterflooded Pools with Minimum Capital Used. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. doi:10.2118/189730-pa. (in English)
11. Bybee, K. (2011). Understanding First, Simulation Later. *Journal of Petroleum Technology*, 63(01), 59–60. doi:10.2118/0111-0059-jpt. (in English)
12. Mendoza, M., Cevallos, G., Molina, E., Piñeiros, S., Torres, W., Garrido, J., ... Paladines, A. (2019). From Concept to Execution: A Successful Integrated Exploitation Philosophy. *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*. doi:10.2118/196734-ms. (in English)
13. Yudin, E. V., Chorniy, A. V., Churanova, N. Y., Soloviev, A. V., Khairullin, M. M., Sadreev, E. A., & Yushmanov, A. I. (2018). Sweep Efficiency Increasing of Fractured Oil-Wet Reservoirs: Case Study of Central Khoreyver Uplift Fields. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. doi:10.2118/191579-18rptc-ms. (in English)
14. Utomo, B., Al-Harbi, M., Razzak, S., Al-Hadyani, F. S., Hamid, S., Shaheen, T., ... Boonjai, P. (2011). Innovative Water Shut Off Solution Combining Real Time Downhole Measurement and Analysis with Zonal Isolation Technologies for Horizontal Open Hole Producer in Ratawi Field - A Case History from Partitioned Zone. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. doi:10.2118/145901-ms. (in English)
15. Kudryashova D.A. 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 Natsionalnogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i Gornoe Delo [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]*. 2018, Vol. 17, No. 1, pp. 26-36. DOI 10.15593/2224-9923/2018.1.3. EDN YXHWLO. (in Russian)
16. Segun-Oki, H., & Eli, A. (2014). Material Balance Methods for Correcting Misallocation of Injected Water: Kadara field Case Study. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. doi:10.2118/172418-ms. (in English)
17. Wang, Y., Cheng, S., Zhang, K., He, Y., Feng, N., Qin, J., ... Yu, H. (2018). A Comprehensive Work Flow to Characterize Waterflood-Induced Fractures by Integrating Real-Time Monitoring, Formation Test, and Dynamic Production Analysis Applied to Changqing Oil Field, China. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. doi:10.2118/191370-pa. (in English)
18. He, Y., Cheng, S., Li, L., Mu, G., Zhang, T., Xu, H., ... Yu, H. (2017). Waterflood Direction and Front Characterization With Four-Step Work Flow: A Case Study in Changqing Oil Field, China. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 20(03), 708–725. doi:10.2118/178053-pa. (in English)
19. Albertoni, A., & Lake, L. W. (2003). Inferring Interwell Connectivity Only From Well-Rate Fluctuations in Waterfloods. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 6(01), 6–16. doi:10.2118/83381-pa. (in English)
20. Chan, K. S. (1995). Water Control Diagnostic Plots. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. doi:10.2118/30775-ms. (in English)

21. Ostapchuk D.A. *Opredelenie prichin obvodneniya skvazhin s pomoshchyu grafikov VNF* [Determination of well flooding causes using water-oil ratio curves]. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2012, pp. 30-31. EDN TUCWLZ. (in Russian)
22. Ostapchuk D.A., Sintsov I.A. *Usovershenstvovannyi diagnosticheskiy metod opredeleniya prichin obvodneniya skvazhin* [Improved diagnostic method for determining the causes of well flooding]. Ukhta: Ukhta State Technical University, 2015. – С. 115-122. – EDN ZTQVZD. (in Russian)
23. Babaev E.T. *Obvodnenie Neftyanykh skvazhin* [Oil Well Flooding]. Nizhnekamsk: Mir Knigi Publ., 2021, pp. 75-78. EDN YYKBZO. (in Russian)
24. Mekunye Francis, Paul Osaze Ogbeide Application of Chan Plot in Water Control Diagnostics for Field Optimization: Water/Gas Coning and Cusping /NIPES Journal of Science and Technology Research 3(4) 2019 pp. 227-232. doi:10.37933/nipes/3.4.2021.23. (in English)
25. Lushpeev V.A., Lushpeeva O.A., Tyukavkina O.V., Strelyaev V.I. Methods of determining the cause of well bores flooding. Georesursy [Georesources]. 2013, No. 2(52), pp. 44-47. – EDN RDKQLH. (in Russian)
26. Leontev D.S., Kleschenko I.I. *Graficheskaya diagnostika prichin obvodneniya neftyanykh skvazhin* [Graphical diagnostics of the causes of oil wells flooding]. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2015, pp. 119-127. EDN UISUGH. (in Russian)
27. Leontev D.S., Kleshchenko I.I., Dolgikh E.F. *Razrabotka programmnogo produkta "Diagnostika prichin obvodneniya neftyanykh i gazovykh skvazhin"* [Development of software product "Diagnostics of oil and gas well flooding causes"]. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2015, pp. 102-112. EDN ULOLKX. (in Russian)
28. Leontev D.S., Kleshchenko I.I. *Primenenie printsipa analiza riskom pri diagnostike prichin obvodneniya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Application of the principle of risk analysis for diagnosing the causes of oil and gas well flooding]. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2015, pp. 178-182. EDN VQUYDP. (in Russian)
29. Ustyugov A.S., Sutyagin V.V., Galiullin M.M. Express-diagnostics of definition of wells water-flooding causes based on field data analysis. Avtomatizatsiya, Telemekhanizatsiya i Svyaz V Neftyanoy Promyshlennosti [Automation, Telemetry and Communication in Petroleum Industry]. 2016, No. 8, pp. 4-9. EDN WGWIFV. (in Russian)
30. Garcia, C. A., Mukhanov, A., & Torres, H. (2019). Chan Plot Signature Identification as a Practical Machine Learning Classification Problem. International Petroleum Technology Conference. doi:10.2523/iptc-19143-ms. (in English)
31. Mett D.A., Petrova E.V. Determination of production wells watering sources based on Chen diagnostic graphs. The approach applicability limits. Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftyanykh i Gazovykh Mestorozhdeniy [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields]. 2019. No. 7, pp. 65-70. DOI 10.30713/2413-5011-2019-7(331)-65-70. EDN MDOKTN. (in Russian)
32. Пля, В., & Diana, S. (2015). Practical Aspects of Modeling of Water Coning in Carbonate Reservoirs. SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition. doi:10.2118/177396-ms. (in English)
33. Izgec, B., & Kabir, C. S. (2009). Real-Time Performance Analysis of Water-Injection Wells. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 12(01), pp. 116–123. doi:10.2118/109876-pa. (in English)
34. Gogri, M. P., Rohleder, J., Kabir, S., Pranter, M., & Reza, Z. (2018). Prognosis for Safe Water-Disposal-Well Operations and Practices That Are Based on Reservoir Flow Modeling and Real-Time Performance Analysis. SPE Reservoir Evaluation & Engineering. doi:10.2118/187083-pa. (in English)

35. Klimov-Kayanidi A.V., Alimkhanov R.T., Agureeva E.S., Sabitov R.M. Waterflood-induced fracture on the injection wells in low-permeability reservoir of Achimovskian sequence. *Izvestiya VUZov. Neft i Gaz [Oil and Gas Studies]*. 2018, No. 2(128), pp. 39-43. DOI 10.31660/0445-0108-2018-2-39-43. EDN XMGQNF. (in Russian)
36. Kulikov A.N., Magzyanov I.R., Shtinov V.A. Graph-analytical methodology of diagnosing of oil wells water-flooding. *Neftepromyslovoe Delo [Petroleum Engineering]*. 2012, No. 8, pp. 11-17. EDN PBRKER. (in Russian)
37. Kulikov A.N. Improvements in well selection procedures to perform the water shut off jobs and to restore the number of production wells. *Neftepromyslovoe Delo [Petroleum Engineering]*. 2012, No. 7, pp. 19-23. EDN PAKDTR. (in Russian)
38. Drofa P.M., Kolesnikova A.A., Murzakova A.F. et.al. Improving the efficiency of field development using automated analytical methods to assess the wells interference and the nature of watering. *Professionalno o Nefti [Professionally about Oil]*. 2023, Vol. 8, No. 3(29), pp. 127-139. DOI 10.51890/2587-7399-2023-8-3-127-139. – EDN TSZFEC. (in Russian)

Сведения об авторах

Рыжов Роман Викторович, аспирант, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, ГБОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет» - «Высшая школа нефти»
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 2
E-mail: rom.ryzhoff2011@yandex.ru

Authors

R.V. Ryzhov, PhD Student, Chair of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Almetьевsk State Technological University – Higher Petroleum School
2, Lenin Str., Almetьевsk, 423450, Russian Federation
E-mail: rom.ryzhoff2011@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 04.07.2024
Принята к публикации 14.09.2024
Опубликована 30.09.2024