

**Step-rate-test как одна из стратегий для управления закачкой
пластовых вод. Проектирование и мониторинг**

Р. Р. Алекберов^{1, 2*}, А. А. Вольф²

¹ООО «ЭПУ-Сервис», Когалым, Россия

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

*1a2s3d4f5gw@mail.ru

Аннотация. Ключевые факторы в построении системы управления пластовой водой (PWM) основываются на стратегии Step-rate-test, которая включает в себя абсолютно новую технологию обработки призабойной зоны пласта и близлежащие трещины от предшествующего гидроразрыва пласта (ГРП). Технология Step-rate-test является экологически чистой в отношении окружающей среды в сравнении с тем же ГРП по ряду причин: отсутствие сшивателя, проппанта и т. д.; отсутствие сброса жидкостей и другого рода реагентов на рельеф и в водные бассейны.

В данной статье рассматриваются технические подходы к решению проблем промыслового обслуживания нагнетательных скважин. Step-rate-test как одна из стратегий для управления закачкой пластовых вод является лучшим выбором в данных операциях. С помощью данной стратегии также можно решить проблему по утилизации лишнего количества жидкости (при большом неработающем фонде) или отходов после ГРП. Достижения, передовой опыт и уроки, извлеченные при моделировании данного процесса, а также эксплуатация, мониторинг, оценка обеспечивают основу для минимизации затрат и сохранения экологии окружающей среды. Объект проведения работ и непосредственно сами инженерные работы связаны между собой целевыми показателями качества, потребности в закачке. Полевые примеры и результаты интеллектуального анализа данных (Тевлинско-Русскинского, Южно-Ягунского и других месторождений) показывают, что различия в данных играют важную роль при выборе объекта. Промысловые данные показывают, что приемистость снижается в структурах матричного введения, несмотря на закачку подготовленной жидкости. Допускается не подготавливать жидкость (отсутствие кустовой насосной станции, концевой делителя фаз трубного и т. д.) перед закачкой. Скелет большинства пород во время нагнетания жидкости разрушается, это влияет на выбор технического оснащения для проведения операции. В статье оцениваются распространение трещин при закачке подготовленной и неподготовленной жидкости и ее влияние на работу скважины.

Ключевые слова: концевой делитель фаз трубный, Step-rate-test, кустовая насосная станция, поддержание пластового давления

Для цитирования: Алекберов, Р. Р. Step-rate-test как одна из стратегий для управления закачкой пластовых вод. Проектирование и мониторинг / Р. Р. Алекберов, А. А. Вольф. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-1-71-79 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 1. – С. 71–79.

**Step-rate-test as one of the strategies for managing formation water
injection. Design and monitoring**

Rashit R. Alekberov^{1, 2*}, Albert A. Volf²

¹*EPU Service LLC, Kogalym, Russia*

²*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

**1a2s3d4f5gw@mail.ru*

Abstract. The construction of a produced water management (PWM) system relies on a Step-rate-test strategy that integrates a novel technology for treating the bottomhole formation zone and adjacent fractures resulting from prior hydraulic fracturing. Step-rate-test technology is considered more environmentally friendly than hydraulic fracturing for several reasons. It doesn't require crosslinkers or proppants, and there is no discharge of liquids or other reagents onto the terrain or into water basins.

This article discusses technical approaches to solving field service problems in injection wells. One of the strategies for managing produced water injection is Step-rate-test, which is considered the best choice in these operations. This strategy can also be used to solve the problem of disposing of excess fluid or waste after hydraulic fracturing. Advances in modelling, operation, monitoring, and evaluation provide the basis for minimising costs and preserving the environment. The connection between the object of work and the engineering works is established through quality targets and pumping requirements. Field example, such as Tevlinsko-Russkinskoye and Yuzhno-Yagunskoye, and results of data mining of them, demonstrate the significant impact of data differences on site selection. Field data indicates that injectivity decreases in matrix injection structures despite the injection of prepared fluid. It is acceptable to inject the fluid without prior preparation, provided that there is no well pad pump station, pipe end phase divider or similar equipment. The majority of rock structures become fractured during fluid injection, which affects the selection of technical equipment for the process. This article evaluates the propagation of fractures during the injection of prepared and unprepared fluids and their impact on well performance.

Keywords: pipe end phase divider, Step-rate-test, well pad pump station, reservoir pressure maintenance

For citation: Alekberov, R. R., & Volf, A. A. (2024). Step-rate-test as one of the strategies for managing formation water injection. Design and monitoring. Oil and Gas Studies, (1), pp. 71-79. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-1-71-79

Введение

Технология Step-rate-test для управления закачкой на нефтяных месторождениях была стабильно применена в течение последних трех лет в различных частях Западной Сибири (г. Когалым, г. Урай, г. Покачи, г. Лангепас). Была предложена дополнительная перспектива утилизации нефте-содержащих сточных вод и твердых частиц в экологически безопасный «бассейн», что, в свою очередь, при адекватной переработке и закачке влияет на повышение нефтеотдачи углеводородов за счет улучшения охвата пластовой жидкости и поддержания пластового давления. Успешное применение данной технологии на нефтяном месторождении не зависит от твердых веществ/загрязнений призабойной зоны пласта (ПЗП).

В данной статье обсуждаются физические явления, а именно матричные введения и закачка в уже существующие трещины, со Step-rate-test и связанными с ними проблемами с учетом приемистости и требований к оборудованию.

Представлена модель, объясняющая цикличность поведения давления нагнетания, наблюдаемого на нескольких стадиях проведения операции. Термальный Step-rate-test может обеспечить сдерживание трещины от увеличения ее длины и уменьшить закачку. Производственные случаи, ясно показывающие эффект от температуры закачиваемой жидкости, зависят также от давления разрыва и приемистости.

Объект исследования

Главный вопрос: как правильно руководствоваться выбранной стратегией (в нашем случае — стратегия Step-rate test (SRT)) для актуального управления закачкой при поддержании пластового давления. Суть процедуры заключается в компенсировании объемов добываемой жидкости закачкой соответствующего объема агента в пласт. Не стоит также забывать про тип заканчивания скважины, это будет одним из основных условий при выборе кандидата под проведение SRT.

Метод исследования

Матрица рисков, представленная на рисунке 1, иллюстрирует проблемы различного характера, их необходимо учитывать при выборе метода управления закачкой.

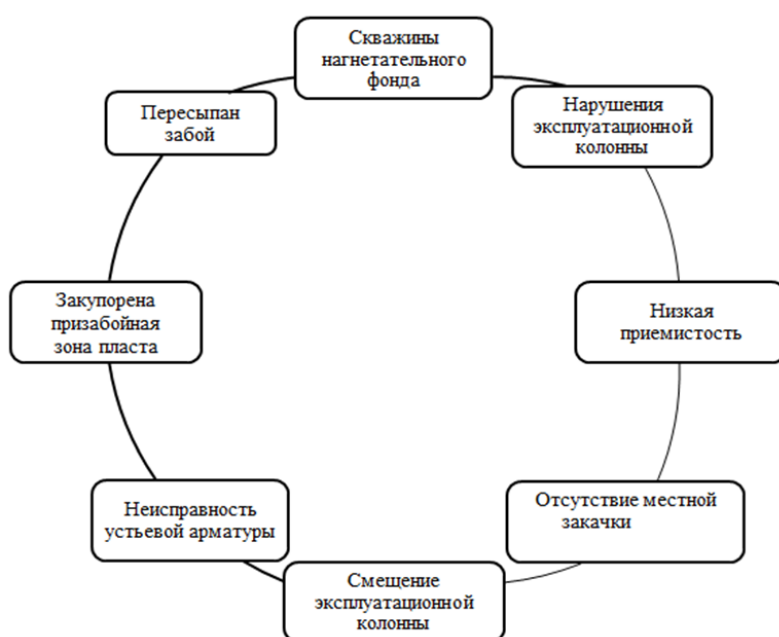


Рис. 1. Матрица рисков

Результаты и обсуждение

В отличие от восстановления хорошей проницаемости, которая требует внешнего вмешательства для последующего восстановления приемистости, закачка в существующие трещины имеет возможность создать новые трещины по всей площади объекта разработки. Это делает закачку в трещины более оптимальной для долгосрочной перспективы, но с более обширными требованиями к системе нагнетания.

Распространенные проблемы, связанные с проведением данного геолого-технологического мероприятия (ГТМ):

- 1) существующие трещины могут оказаться неспособными к увеличению своей площади;
- 2) существующие трещины могут быть изначально слишком деформированы и закупорены;
- 3) в ПЗП сформируется положительный скин-фактор, который будет препятствовать и оказывать дополнительное сопротивление при проведении операции.

Несмотря на проблемы, которые могут возникнуть во время нагнетания при SRT, непрерывная закачка в момент эксплуатации позволяет закачивать воду гораздо более низкого качества, чем необходимо. Ввиду этого происходит консолидация загрязняющих веществ. Если горная порода имеет хорошую сеть трещин, то тогда обычно требуется нечастое проведение SRT. Если, к примеру, пласт имеет другую структуру, тогда частота вмешательств (SRT) может проводиться до двух раз в месяц. Иногда, сделав дополнительно кислотную ванну, после проведения промывки можно достичь кратковременного восстановления приемистости из-за сложности закачки кислоты вглубь пласта.

Постепенное закупоривание пласта (также ПЗП) приводит к неуклонному снижению приемистости. В некоторых случаях это снижение может быть весьма быстрым в зависимости от пластовых условий и качества закачиваемой воды [1]. С другой стороны, трещиноватые скважины имеют тенденцию сохранять приемистость на протяжении всего процесса распространения трещин, что создает хорошую перспективу для образования дополнительных трещин при SRT. Однако, для того чтобы поддерживать распространение трещин в указанные интервалы, требуется более высокое давление нагнетания.

Этого можно добиться, если насосы (ЦНС (центробежный насос секционный) на БКНС (блочной кустовой насосной станции), местная закачка, шурфы, коллаидеры и т. д.) будут выдавать необходимую мощность. Долгосрочные данные по закачке для введения в матрицу горной породы демонстрируют различную размерность, иногда получается отследить тренд с уменьшением приемистости от более ранних наблюдений к более поздним. Более ранние показания имеют меньшее начальное давление нагнетания, с течением времени давление нагнетания увеличивается, в то время как скорость потока постепенно снижается, что приводит к постепенному увеличению дополнительных сопротивлений [2].

Спроектируем данные о приемистости скважин на разных месторождениях и сформируем концептуальное представление (объяснение) процесса стимуляции и распространения трещин.

На рисунке 2 (выгружено из симулятора, специализированного ПО, СТМК-телемеханика) отображены данные истории закачек с использованием традиционной системы поддержания пластового давления карбонатного коллектора.

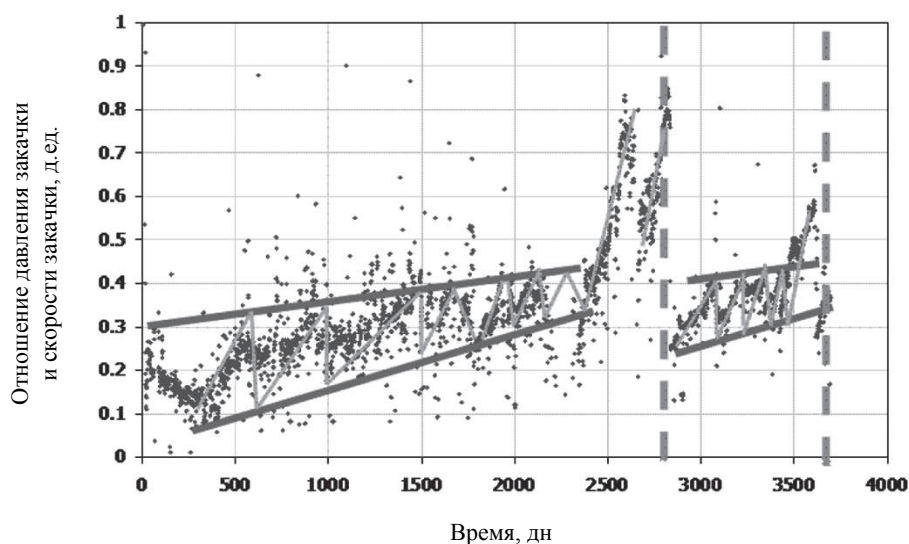


Рис. 2. История эксплуатации карбонатного коллектора скважины 795 кустовой площадки № 20 Южно-Ягунского месторождения

Увеличение индекса частного (под индексом частного подразумевается давление к скорости закачки агента) указывает на то, что для нагнетания с заданной скоростью требуется большее давление, что приводит к снижению приемистости [3]. И наоборот, уменьшение индекса частного представляет собой возрастающую приемистость. Полевые данные обычно указывают на то, что частное колеблется между верхним и нижним пределом, причем приемистость скважины сильно зависит от изменения наклона между двумя пределами.

Общая тенденция данных на рисунке 2 указывает на увеличение индекса частного, что подразумевает снижение приемистости скважины. Данные скважины, представленные на рисунке 2, можно разделить на два этапа. Окончание первого этапа, примерно 2 500 дней эксплуатации, с соответственно быстро растущими значениями индекса частного. Второй этап начинается примерно через 2 800 дней и длится до тех пор, пока снова не будет наблюдаться быстрое увеличение индекса частного. Колебания индекса частного между ограничивающими пределами, наблюдаемые во время этих двух этапов, можно примерно спрогнозировать. Как показано на рисунке 2, резкий рост индекса частного в конце первого этапа свидетельствует о снижении приемистости, в этот момент была проведена процедура SRT для удаления отложений в ПЗП. В результате проведения SRT была восстановлена частичная приемистость пласта, которая соответствует значениям индекса частного в начале второго этапа, примерно равным значениям индекса частного в начале первого этапа.

Выбор такого ГТМ, как SRT, играет важную роль в эксплуатационном периоде любой нагнетательной скважины, так как данная процедура имеет особое влияние на расход энергии для закачки подготовленных жидкостей.

Например, внедрение специальных реагентов (соляной кислоты, горячей кислоты, горячей нефти и т. д.) увеличивает расходы из-за повышенных требований к подготовке, сопровождению, а также мониторингу для прогноза эффективности проведенных операций. Как происходит удаленный мониторинг после проведения ГТМ.

Работа в программном обеспечении.

1. Запуск Альянс телемеханики (ТМ), чтобы проверить показатели текущей закачки жидкости.

2. На каждой нагнетательной скважине должны быть установлены скважинные (наземные) датчики давления и температуры, и данные должны выходить в систему Альянс ТМ.

3. Перед открытием закачки обслуживающий персонал должен убедиться в исправности устьевой арматуры, запорной арматуры, целостности подводных трубопроводов, наличии блока гребенки (БГ), если фонд скважин на кустовой площадке более 5 ед., причем БГ рекомендовано иметь закрытого типа, исправного и поверенного манометра на лубрикаторной запорной арматуре.

4. На всех устьевых арматурах должен присутствовать расходомер, для того чтобы велся учет количества закачиваемой жидкости. Данные с расходомера подтягиваются в систему удаленного мониторинга Альянс ТМ. Единицы измерения: если объемный расход — $\text{м}^3/\text{сут}$, если массовый расход — $\text{тн}/\text{сут}$.

5. После запуска нагнетательной скважины в работу и вывода ее на стабильный режим закачки (когда происходит насыщение пласта, заполнение ствола скважины) рекомендуется попеременно изменять режим работы скважины путем смены штуцеров (в запорной арматуре, между фланцев устьевой арматуры и т. д.), регулирование закачки открытием/закрытием центральной запорной арматуры, на КНС снижение частоты вращения ЦНС с помощью частотного преобразователя для оценки состояния призабойной зоны пласта, оценки эффективности проведенного ГТМ.

В дополнение к техническим требованиям при проведении SRT цена и экономическая целесообразность должны быть отображены для определения различных вариантов закачки. Подсчитываются операционные расходы, затраченные для найма техники, людей, аренды помещений, закупа реагентов и многого другого.

Далее перейдем к обсуждению представленной модели на рисунке 3.

Модель предполагает, что за началом образования трещин следует серия последовательных разломов в ПЗП. В ходе этого процесса поврежденные участки начинают формировать большое количество трещин, которые имеют тенденцию к увеличению по длине и ширине и, таким образом, позволяют поддерживать приемистость скважины.

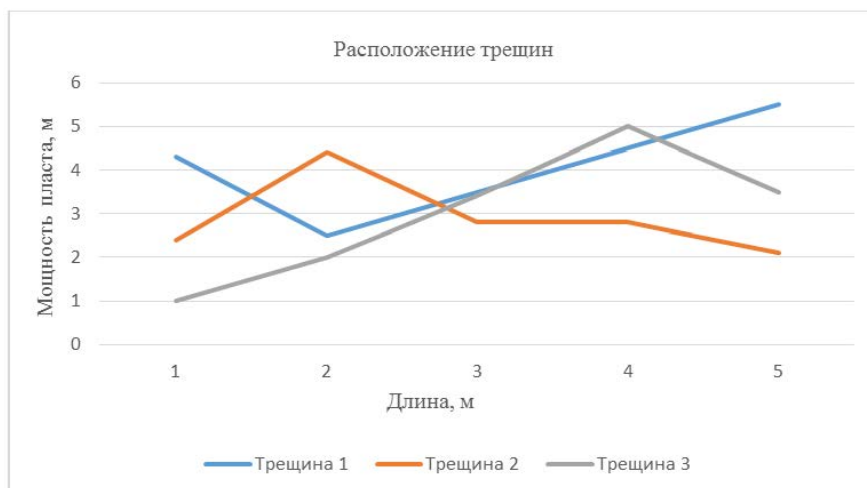


Рис. 3. Схематическое распространение трещин

Предположим, что SRT привел к образованию новых трещин. Эксплуатация в стационарном режиме зачастую приводит к образованию и накоплению загрязняющих веществ (твердые частицы и т. д.) внутри трещины [4]. Непрерывное накопление примесей снижает приемистость. Следовательно, индекс частного увеличивается. Начальное давление нагнетания в стационарной трещине устанавливает нижнюю границу модели. Это соответствует минимальному давлению, необходимому для возможного образования новых разломов. По мере продолжения увеличения давления нагнетания увеличивается тенденция, соответствующая кривой повреждения, до тех пор, пока давления хватает для увеличения поврежденного участка. Давление, соответствующее расширению поврежденной трещины, представляет собой верхнюю границу. Распространение трещины создает новую площадь поверхности для нагнетания, уменьшая необходимое давление нагнетания [5]. Таким образом, уменьшение индекса частного приводит к увеличению разрыва трещин при SRT, что обеспечивает чистую, неповрежденную площадь для нагнетания. В этот момент снижение давления нагнетания приводит к колюматации трещины и увеличению требуемого давления нагнетания. Этот циклический процесс характеризуется очередным увеличением и уменьшением индекса частного. Резкое увеличение сопротивления при нагнетании соответствует моменту, когда трещина полностью закупорилась и дальнейшее проведение операции невозможно. Однако разные породы демонстрируют разные тенденции в отношении порогов нагнетания. Карбонатный коллектор, показанный на рисунке 2, показал сближение верхнего и нижнего пределов с резким увеличением индекса частного, с другой стороны, на рисунке 3 показаны три различные ситуации для трех трещин в глинистых породах, что указывает на то, что SRT в таких породах может иногда привести к хорошей перспективе по закачке.

Выводы

1. Качество закачиваемой жидкости имеет прямую взаимосвязь со снижением приемистости нагнетательной скважины, поэтому внедрение системы поддержания пластового давления обязательно должно сопровождаться контролем качества закачиваемой жидкости.
2. SRT дает преимущество, даже если качество жидкости плохое.
3. Снижение температуры пласта может быть достигнуто закачкой при нулевом скин-факторе и естественном давлении гидроразрыва. В конце концов, в скважине в любом случае произойдет увеличение трещины. Для определения момента разрыва можно выполнить исследование на ступенчатую скорость закачки.
4. Закачка с постоянной скоростью, ниже давления гидроразрыва, позволит распространяться трещинам по мере продвижения теплового фронта.
5. Закачка длительное время неподготовленной жидкости, минуя кустовые насосные станции, буферные емкости, блок дозирования реагента, в матрицу породы приводит к быстрой потере приемистости скважины. Поэтому длительная закачка требует высококачественной и хорошо подготовленной жидкости. Это, в свою очередь, увеличивает эксплуатационные затраты на подготовку и реализацию данной жидкости для системы поддержания пластового давления.
6. Остановка насосных агрегатов на кустовой насосной станции с последующим обратным потоком жидкости в ствол скважины приводит к нулевому результату по увеличению приемистости после проведения ГТМ, так как, к примеру, если при ГРП происходит плохое структурирование проппанта в призабойной зоне пласта, то во время обратного потока жидкости часть проппанта (плохо закрепившегося) высыпается на забой скважины, тем самым перекрывая перфорационные отверстия и снижая закачку жидкости, как следствие. Либо на 100 % происходит перекрытие перфорационных отверстий.

Список источников

1. Специальные гидродинамические исследования для мониторинга за развитием трещин ГРП в нагнетательных скважинах / В. А. Байков, А. Я. Давлетбаев, Р. Н. Асмандияров [и др.]. – Текст : электронный // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2011. – № 1. – URL: <http://ogbus.ru/issue/view/issue12011>. – Дата публикации: 01 января 2011.
2. Гидродинамические методы контроля за развитием трещин авто-ГРП при заводнении в низкопроницаемых коллекторах / А. Я. Давлетбаев, Г. Ф. Асалузина, Д. С. Иващенко [и др.]. – Текст : электронный // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2015. – URL: <https://doi.org/10.2118/176562-MS>.
3. Влияние термоупругого эффекта на развитие трещин автоГРП в нагнетательной скважине с трещиной ГРП / О. В. Салимов, И. И. Гирфанов, А. В. Кочетков [и др.]. – DOI 10.18599/grs.18.1.8. – Текст : непосредственный // Георесурсы. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 46–50.

4. Cheng, A. H.-D. Poroelasticity / A. H.-D. Cheng. – DOI 10.1007/978-3-319-25202-5. – Cham : Springer, 2016. – 877 p. – Direct text.
5. Clifford, P. J. Simulation of waterflood fracture growth with coupled fluid flow, temperature and rock elasticity / P. J. Clifford. – Text : electronic // ECMOR I - 1st European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. – Cambridge, 1989. – URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201411304>.

References

1. Baikov, V. A., Davletbaev, A. Ya., Asmandiyarov, R. N., Usmanov, T. S., & Stepanova, Z. Yu. (2011). Special well tests to fractured water injection wells. *Neftegazovoye delo*, (1). (In Russian). Available at: <http://ogbus.ru/issue/view/issue12011>
2. Davletbaev, A. Ya., Asalkhuzina, G. F., Ivaschenko, D. S., Fedorov, A. I., Fursov, G. A., Nazargalin, E. R.,... Valeeva, E. Z. (2015). Methods of research for the development of spontaneous growth of induced fractures during flooding in low permeability reservoirs. SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow. (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.2118/176562-MS>
3. Salimov, O. V., Girfanov, I. I., Kochetkov, A. V., Ziyatdinov, R. Z., & Morozov, P. G. (2016). The influence of thermoelastic effect on cracks of automatic hydraulic fracturing in injection wells. *Georesources*, 18(1), pp. 46-50. (In Russian). DOI: 10.18599/grs.18.1.8
4. Cheng, A. H.-D. (2016). Poroelasticity. Cham, Springer, 877 p. (In English). DOI: 10.1007/978-3-319-25202-5
5. Clifford, P. J. (1989). Simulation of waterflood fracture growth with coupled fluid flow, temperature and rock elasticity. ECMOR I - 1st European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. Cambridge. (In English). Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201411304>

Информация об авторах / Information about the authors

Алекберов Рашид Расимович, инженер-технолог, ООО «ЭПУ-Сервис», г. Когалым; магистрант, соискатель к. т. н., Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, 1a2s3d4f5gw@mail.ru

Rashit R. Alekberov, Process Engineer, EPU Service LLC, Kogalym; Master's Student, Applicant Candidate of Engineering, Industrial University of Tyumen, 1a2s3d4f5gw@mail.ru

Вольф Альберт Альбертович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Albert A. Volf, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields, Industrial University of Tyumen

Статья поступила в редакцию 06.01.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2024; принята к публикации 18.01.2024.

The article was submitted 06.01.2024; approved after reviewing 15.01.2024; accepted for publication 18.01.2024.