



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

НЕФТЕПРОМЫСЛОВОЕ ДЕЛО

OILFIELD
ENGINEERING

6(678).2025



Российский государственный университет (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Издательский дом «Губкин»

выпускает литературу (сборники, справочники), освещающую современный уровень и тенденции развития науки, техники и технологий, экономики, организации производства и управления в нефтегазовой промышленности; издает журналы:

- Автоматизация и информатизация ТЭК
- Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений
- Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе
- Нефтепромысловое дело
- Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса
- Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом
- Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море
- Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

оказывает информационную поддержку
выставочных и научных мероприятий



<https://journal.gubkin.ru>



Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина"

Журнал основан в 1965 г.

Выходит 12 раз в год

Научно-технический журнал
НЕФТЕПРОМЫСЛОВОЕ ДЕЛО.
OILFIELD ENGINEERING

6(678)•2025

Июнь

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

Михайлов Н.Н. – д. т. н., профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва;

Зам. главного редактора

Астахова А.Н. – к. т. н., выпускающий редактор Издательского дома "Губкин" РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва;

Антипова И.А. – выпускающий редактор Издательского дома "Губкин" РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва;

Велиев Н.А. – д. т. н., профессор, академик Азербайджанской инженерной академии, начальник Департамента науки, техники и нанотехнологий SOCAR (Азербайджан), г. Баку;

Габибов И.А. – д. т. н., профессор, зав. кафедрой АГУНП, г. Баку;

Даришев В.И. – к. т. н., зам. генерального директора по научно-техническому развитию и инновациям ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг";

Ермилов О.М. – д. т. н., профессор, академик РАН, зам. главного инженера по науке ООО "Газпром добывающая Надым", г. Надым;

Зейналов Р.Р. – д. т. н., доцент, академик Азербайджанской инженерной академии, генеральный директор "Инновационно-производственного Центра" (Азербайджан), г. Баку;

Кязимов Э.А. – д. т. н., государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики SOCAR, г. Баку;

Муллакаев М.С. – д. т. н., ведущий научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва;

Муслимов Р.Х. – д. т. н., консультант Президента РТ по вопросам разработки нефтяных и нефтегазовых месторождений, профессор Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань;

Мухаметшин В.Ш. – д. г.-м. н., профессор, директор Института нефти и газа ФГБОУ ВО "УГНТУ" в г. Октябрьском, г. Октябрьский;

Попов С.Н. – д. т. н., главный научный сотрудник Института проблем нефти и газа РАН, г. Москва;

Сафин С.Г. – д. т. н., профессор, эксперт Федерального реестра научно-технической сферы Минобрнауки РФ, г. Архангельск;

Хисамов Р.С. – д. г.-м. н., профессор, действительный член Академии наук Республики Татарстан, г. Альметьевск

Выпускающий редактор: *И.А. Антипова*

Компьютерный набор: *В.В. Васина*

Компьютерная верстка: *Е.В. Кобелькова*

Корректор: *З.А. Калинина*

Переводчик: *О.М. Бисярина*

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА НЕФТИНЫХ И ГАЗОНЕФТИНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Люо Сюохань, Бакиева А.Б., Цзин Юй, Ян Шуо. Испытание пластов на приёмистость для организации системы поддержания пластового давления на карбонатном месторождении.....	5
Смотриков Н.А., Иктысанов В.А., Байгушев А.В., Фаттахов И.Г., Ячменева Е.А., Пименов А.А. Предельные и оптимальные давления нагнетания для скважин ПАО "Татнефть"	14

МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ И ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Зубарева И.А., Иванцов Н.Н. Исследование способов термополимерного воздействия	20
Будкевич Р.Л., Гайфуллин Т.Л., Аленькин И.А., Закиров Р.Р., Белова Т.Т., Ибраев А.А. Изучение составов на основе органических кислот для применения при обработке призабойной зоны...26	26

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТОВ И СКВАЖИН

Горицко К.А., Федоров А.Э., Хабибуллин Р.А., Вербицкий В.С., Иванов В.А., Карташцева И.А. Метод оценки сепарации газа в периодическом режиме эксплуатации скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса. Часть 1	36
Ермолаев А.И., Стулов Л.Г., Лосев А.П., Кильмаматов А.А., Попич Д., Пантич Я. Анализ физико-химических факторов, осложняющих глушение скважин, на примере группы залежей АО "НИС" (Сербия)	48

ТЕКУЩИЙ И КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ СКВАЖИН

Круглов Я.А., Тюкашкина О.В. Опыт применения обратных эмульсий в качестве промывочных жидкостей при проведении капитальных ремонтов скважин на месторождениях Восточной Сибири	59
---	----

ВЫСТАВКИ • СИМПОЗИУМЫ • КОНФЕРЕНЦИИ

Итоги Международной выставки "Нефтегаз-2025"	65
--	----

Учредитель журнала – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина"

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций РФ от 25.12.2020 г. Рег. № ПИ ФС 77-800053.

Решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ НТЖ "Нефтепромысловое дело" включен в "Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук".

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

НТЖ "Нефтепромысловое дело"
входит в международную реферативную базу данных и систему цитирования Chemical Abstracts.

Индекс журнала:
10336 – по объединенному
10337 каталогу "Пресса России".

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за соблюдение принципов научной этики и достоверность приведенных сведений.

Мнение редакционной коллегии не всегда совпадает с мнением автора материала.

Адрес редакции: 119991, Россия, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1.

Тел. редакции: (499) 507-91-17.

Адрес электронной почты: oil_engineering@mail.ru

Чтобы всегда быть в курсе последних новостей журнала, приглашаем посетить сайт gubkin.ru и подписаться на наш Telegram-канал Издательский дом "Губкин"!



© РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2025

При перепечатке материала ссылка на издание обязательна.

Редакционный совет научно-технических журналов, издаваемых РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Мартынов В.Г. – Ректор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р экон. наук, профессор, академик РАО, председатель совета

Максименко А.Ф. – Проректор по международной работе РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р техн. наук, профессор, заместитель председателя совета

Лопатин А.С. – Председатель комиссии по редакционно-издательской деятельности Ученого Совета РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала "Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса", заместитель председателя совета

Завьялов А.П. – Директор Издательского дома "Губкин" РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, канд. техн. наук, доцент, секретарь совета

Близнюков В.Ю. – Руководитель проекта ПАО "НК "Роснефть", д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала "Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море" (по согласованию)

Голунов Н.Н. – Проректор по дополнительному профессиональному образованию РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, канд. техн. наук, доцент

Дедов А.Г. – Заведующий кафедрой РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р хим. наук, профессор, академик РАН, главный редактор журнала "Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина"

Дмитриевский А.Н. – Научный руководитель ИПНГ РАН, д-р геол.-минер. наук, профессор, академик РАН, главный редактор журнала "Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений"

Ивановский В.Н. – Заведующий кафедрой РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала "Территория Нефтегаз"

Казак А.С. – Ученый секретарь ООО "НИИгазэкономика", д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала "Автоматизация и информатизация ТЭК" (по согласованию)

Комков А.Н. – Начальник Управления наукометрических исследований и поддержки публикационной активности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, заведующий кафедрой РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, канд. техн. наук, доцент

Лоповок Г.Б. – Директор Издательского центра РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, канд. экон. наук, доцент

Мастепанов А.М. – Главный научный сотрудник Аналитического центра энергетической политики и безопасности ИПНГ РАН, профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р экон. наук, профессор, главный редактор журнала "Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом"

Мельгунов В.Д. – Заведующий кафедрой РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р юр. наук, профессор

Мещеряков С.В. – Заведующий кафедрой РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р техн. наук, профессор, заместитель главного редактора журнала "Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе"

Михайлов Н.Н. – Профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р техн. наук, главный редактор журнала "Нефтепромысловое дело"

Поздняков А.П. – Профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р техн. наук, заместитель главного редактора журнала "Автоматизация и информатизация ТЭК"

Постникова О.В. – Декан факультета геологии и геофизики нефти и газа РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р геол.-минерал. наук, профессор

Соловьев А.А. – Заместитель директора ФГБУ "Всероссийский научно-исследовательский институт охраны окружающей среды", главный редактор журнала "Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе", д-р хим. наук, профессор (по согласованию)

Телегина Е.А. – Декан факультета международного энергетического бизнеса РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р экон. наук, профессор, член-корреспондент РАН

Туманян Б.П. – Профессор РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д-р техн. наук, главный редактор журналов "Химия и технология топлив и масел", "Технологии нефти и газа", "Промышленный сервис"

Нефтепромысловое дело. 2025. № 6(678). С. 14–19.

Oilfield engineering. 2025;(6(678)):14–19.

Научная статья

УДК 622.276.432

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

ПРЕДЕЛЬНЫЕ И ОПТИМАЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ ДЛЯ СКВАЖИН ПАО "ТАТНЕФТЬ"

Н.А. Смотриков¹, В.А. Иктисанов², А.В. Байгушев³, И.Г. Фаттахов⁴, Е.А. Ячменева⁵, А.А. Пименов⁶

^{1, 3, 4, 6}Институт "ТатНИПИнефть" ПАО "Татнефть" имени В.Д. Шашина, Альметьевск, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

¹nekolay148@mail.ru, ²iktissanov@yandex.ru, ³baigushev@mail.ru, ⁴i-fattakhov@rambler.ru,

⁵eayachmenjova@gmail.com

Аннотация. Проведены гидродинамические исследования скважин на установившихся и неустановившихся режимах фильтрации, по результатам которых определено давление трещинообразования. Повышение давления закачки выше этого давления не рекомендуется, чтобы избежать прорыва воды к добывающим скважинам. Выявлены зависимости предельного давления от определяющих параметров для средне- и глубокозалегающих пород. Выполненные исследования привели к созданию эмпирических формул для расчета предельного давления терригенных и карбонатных коллекторов. Обнаружено отличие определяющих параметров для средне- и глубокозалегающих коллекторов независимо от типа коллектора. Выявлено существование довольно высоких коэффициентов экспоненциальной зависимости гидропроводности от давления по сравнению с петрофизическими исследованиями, что, вероятно, вызвано дополнительным влиянием нелинейно-вязкой фильтрации. Рассмотрены вопросы оптимальных давлений закачки. Показано, что на поздних стадиях разработки при высокой обводненности следует стремиться не к максимуму добычи нефти, а к максимуму чистого дисконтированного дохода, для чего следует снижать давление закачки, приводя его к предельным давлениям.

Ключевые слова: гидродинамические исследования, предельное давление, оптимальное давление, закачка, нагнетательная скважина

Для цитирования: Предельные и оптимальные давления нагнетания для скважин ПАО "Татнефть" / Н.А. Смотриков, В.А. Иктисанов, А.В. Байгушев [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2025. – № 6(678). – С. 14–19.

Original article

LIMITED AND OPTIMUM DISCHARGE PRESSURES FOR WELLS OF PJSC "TATNEFT"

Н.А. Smotrikov¹, В.А. Iktisanov², А.В. Baygushev³, И.Г. Fattakhov⁴, Е.А. Yachmeneva⁵, А.А. Pimenov⁶

^{1, 3, 4, 6}TatNIPIneft PJSC "TATNEFT" named after V.D. Shashin, Almetyevsk, Russia

²St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

⁵Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

¹nekolay148@mail.ru, ²iktissanov@yandex.ru, ³baigushev@mail.ru, ⁴i-fattakhov@rambler.ru, ⁵eayachmenjova@gmail.com

Abstract. Hydrodynamic studies of wells were carried out under steady and unsteady filtration modes, according to the results of which the fracture formation pressure was determined. The injection pressure increase above this pressure is not recommended in order to avoid water breakthrough to production wells. Dependences of the ultimate pressure on the determining parameters for medium- and deep-lying rocks were revealed. The performed studies led to the creation of empirical formulas for calculating the ultimate pressure of terrigenous and carbonate reservoirs. The difference of the determining parameters for medium- and deep-lying reservoirs, regardless of the type of the reservoir, was found. The existence of fairly high coefficients of hydraulic conductivity exponential dependence on pressure was revealed in comparison with petrophysical studies, which is probably caused by the additional influence of nonlinear viscous filtration. The problems of optimal injection pressures are considered. It is shown that at the late stages of development with high water cut, one should strive not for maximum oil production, but for maximum net present income, which requires reduction of injection pressure, bringing it to maximum pressures.

Keywords: hydrodynamic studies, maximum pressure, optimal pressure, injection, injection well

For citation: Limited and optimum discharge pressures for wells of PJSC "TATNEFT" / N.A. Smotrikov, V.A. Iktisanov, A.V. Baygushev [et al.] // Oilfield engineering. 2025;6(678):14–19.

Одной из важных задач в организации системы разработки является выбор режимов работы скважин, т. е. обоснование и задание забойных давлений. На первый взгляд, снижение забойного давления в добывающей скважине и его повышение в нагнетательной скважине должны способствовать интенсификации процесса разработки [1]. Впервые это мнение высказал академик А.П. Крылов в середине прошлого века. Однако если коснуться деталей, например, закачки, то обнаружится, что чрезмерное повышение забойного давления приведет к гидроразрыву пласта (ГРП) и образованию трещин [2]. С одной стороны, это положительный момент, так как появляется возможность закачать большие объемы воды в пласт. С другой стороны, вода, устремляясь по трещинам, быстро достигнет забоев добывающих скважин и обводнит их продукцию. Поэтому необходимо создать некое оптимальное давление закачки, которое поддерживало бы эффективный процесс заводнения пластов [3].

Ранее в этом направлении было выполнено много исследований, которые показали, что основной причиной существования предельного давления является раскрытие имеющихся или образование новых трещин при превышении некоторого предельного давления. Определить его можно различными способами:

- по резкому изменению коэффициента приёмистости на индикаторной диаграмме;
- по резкому изменению фильтрационных параметров пласта по результатам интерпретации каждого режима индикаторной диаграммы и кривой падения давления;
- по максимуму относительной работающей толщины пласта по результатам промыслового-геофизических исследований;

- по результатам ранее выполненных ГРП;
- расчетным путем через задаваемый коэффициент Пуассона [4].

Кроме того, следует учитывать риск возможного смятия эксплуатационных колонн нагнетательных скважин, возможного разрыва покрышки пласта при его неглубоком залегании и др. В связи с этим выбор давления закачки представляет собой отдельную сложную проблему [5, 6].

Промысловые специализированные исследования

В статье рассмотрены вопросы определения предельных давлений по результатам гидродинамических исследований (ГДИ) карбонатных и терригенных коллекторов месторождений ПАО "Татнефть". Для этого выбраны нагнетательные скважины с возможностью записи приёмистости стационарными средствами замера. В скважину спускался глубинный манометр либо она оснащалась устьевым записывающим манометром. Результатом исследований 16 скважин терригенных отложений и 34 скважин карбонатных отложений являются записи приёмистости и давления на различных режимах работы скважины и остановки в конце исследований (рис. 1). На основании полученных данных строились индикаторные диаграммы, на которых определялся характерный излом. Дополнительно к этому в большинстве случаев рассчитывались проницаемости (гидропроводности) на каждом режиме работы скважины, строился график зависимости от приёмистости или давления, на котором также определялся явный излом, характеризующий изменение фильтрационных параметров (рис. 2). Давления трещинообразования или предельные давления, определя-

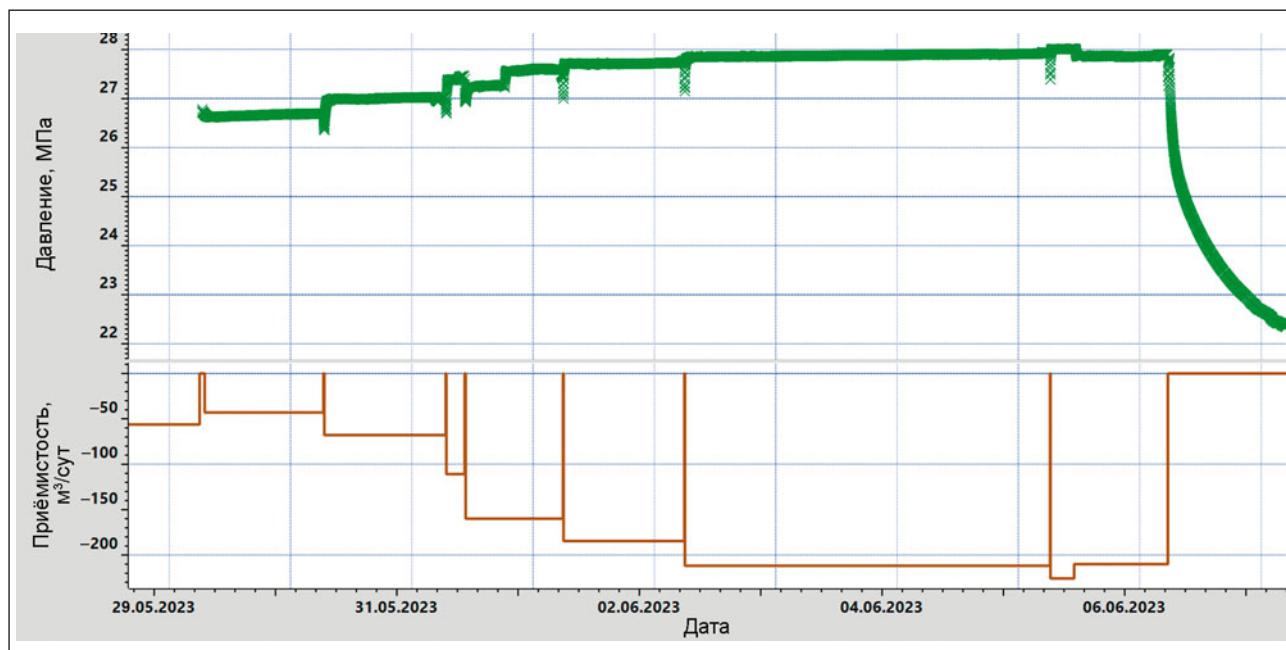


Рис. 1. Пример записи давления и приёмистости при исследованиях терригенных коллекторов (скв. 1)

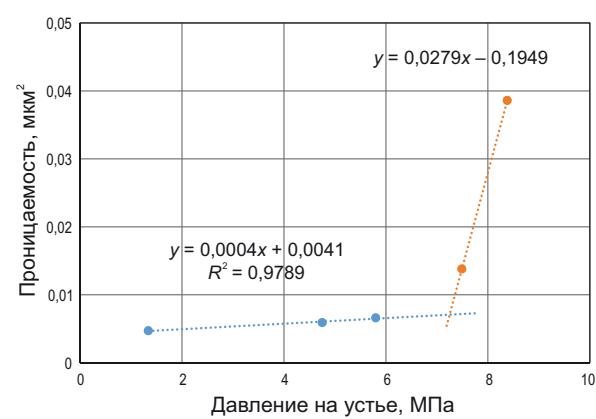


Рис. 2. Пример изменения проницаемости в зависимости от давления закачки (карбонатные отложения скв. 2)

емые различными способами, были достаточно близки друг к другу.

Определение предельных давлений

Полученные предельные давления имели значительный разброс даже в рамках одного типа отложений, поэтому следующей задачей являлся выбор определяющих параметров для предельного давления.

В процессе поиска решения было замечено, что для карбонатных турнейских, башкирских отложений и близкорасположенных терригенных бобриковских отложений предельное давление имеет высокий коэффициент корреляции в зависимости от пластового давления (рис. 3), что позволяет использовать полученные зависимости в практических целях. Причиной отмеченной тенденции, вероятно, является выполнение условий для известной формулы Б.А. Итона, в которой установлена связь между градиентом давления образования трещины и коэффициентом Пуассона [7]

$$\frac{P_{tp}}{H} = \left(\frac{P_{горн}}{H} - \frac{P_{пл}}{H} \right) \left(\frac{v}{1-v} \right) + \frac{P_{пл}}{H}, \quad (1)$$

где $P_{горн}$, $P_{пл}$ – горное и пластовое давление, соответственно; v – коэффициент Пуассона; H – толщина пласта; P_{tp} – давление трещинообразования.

По формуле (1) можно обратным счетом вычислить усредненный коэффициент Пуассона для пласта в пределах дренирования скважины (рис. 4). Расчеты по формуле (1), безусловно, приближенные с учетом более сложной картины напряжений. Однако из полученной зависимости видно, что коэффициент Пуассона – не постоянная величина и влияет на предельную репрессию: чем более хрупкие породы, т. е. чем меньше коэффициент Пуассона, тем меньше предельная репрессия, приводящая к образованию трещин. И, наоборот, чем больше пластичной составляющей в породе, тем выше разность между пластовым давлением и давлением трещинообразования [8, 9].

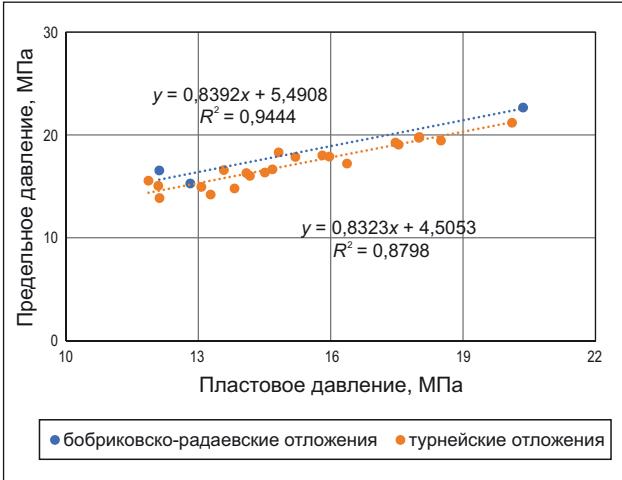


Рис. 3. Зависимость предельного давления от пластового

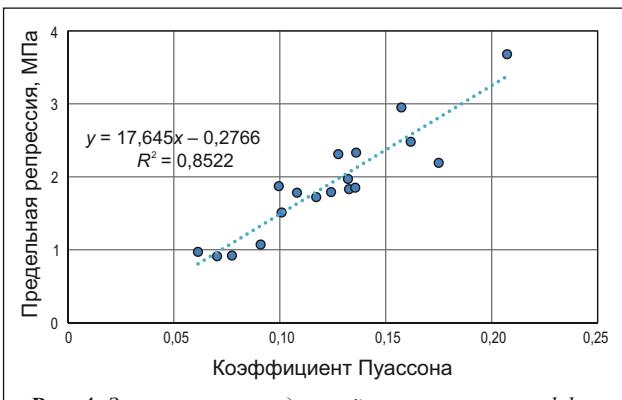


Рис. 4. Зависимость предельной репрессии от коэффициента Пуассона по результатам ГДИ для турнейских отложений

Оказалось, что для глубокозалегающих кыновско-пашийских отложений по сравнению с рассмотренными карбонатными отложениями пластовое давление не является определяющим фактором. Но принимая во внимание глубину залегания кровли пласта, коэффициент приёмистости и удлинение скважины, это позволило создать расчетную зависимость для определения предельных давлений с высоким коэффициентом корреляции ($R^2 = 0,88$)

$$P_{зпр} = -1,62 + 0,0166 H_{kp} + 0,036 L_{удл} - 0,20 PI, \quad (2)$$

где $P_{зпр}$ – предельное забойное давление, МПа; H_{kp} – глубина кровли, м; $L_{удл}$ – удлинение, м; PI – коэффициент приёмистости, м³/сут·МПа).

Наибольшее влияние оказывает коэффициент приёмистости, который косвенно характеризует тип коллектора (глинистый и безглинистый, высоко- и низкопроницаемый). В общем случае, согласно уравнению (2), чем выше приёмистость, тем ниже предельное давление, это является положительным фактором, способствующим уменьшению непроизводительной закачки в промытых коллекторах [10].

Как отмечалось, использование пластового, эффективного и горного давлений в качестве определяющих

параметров не привело к повышению точности определения предельного давления, хотя учет глубины залегания кровли пласта при определении эффективного и горного давлений, оказало влияние. Еще более неожиданным оказалось влияние удлинения скважины, т. е. её отхода от вертикали. Согласно уравнению (2), коэффициент при удлинении $L_{удл}$ примерно в 3 раза выше, чем коэффициент при глубине кровли пласта H_{kp} . Возможно, объяснение этой тенденции заключается в увеличении потерь на трение за счет большей длины, что приводит к росту предельного давления.

Использование экспоненциальной зависимости гидропроводности от давления

На первый взгляд, поставленная задача является решенной, поскольку определены зависимости для расчета предельных давлений для различного типа отложений и приведено их физическое обоснование [11, 12]. Однако в процессе обсуждения было принято решение рассмотреть данную проблематику с точки зрения оптимизации разработки. Поэтому далее рассмотрена задача определения не предельного, а оптимального с позиций разработки давления закачки. Но для этого необходимо было учесть нелинейность индикаторных диаграмм.

Заметим, что индикаторную диаграмму можно хорошо описать не только через пересечение двух прямых через точку предельного давления, но и при помощи экспоненциальной зависимости проницаемости от давления [13] (рис. 5). Степень искривления характеризует параметр α , применяемый в известной формуле $k/k_0 = e^{-\alpha(P-P_0)}$. В этом случае уже меняется физика процесса, так как вместо образования трещины происходит постепенное раскрытие уже имеющихся природных или техногенных трещин [14].

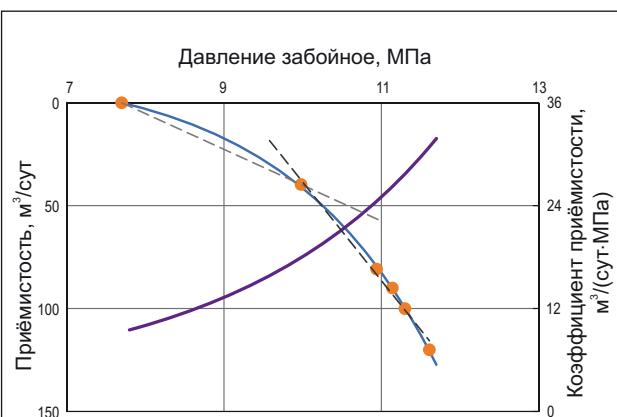


Рис. 5. Пример описания индикаторной диаграммы двумя способами (пересечение прямых и экспоненциальная зависимость проницаемости от давления) для бобриковских отложений (скв. 3)

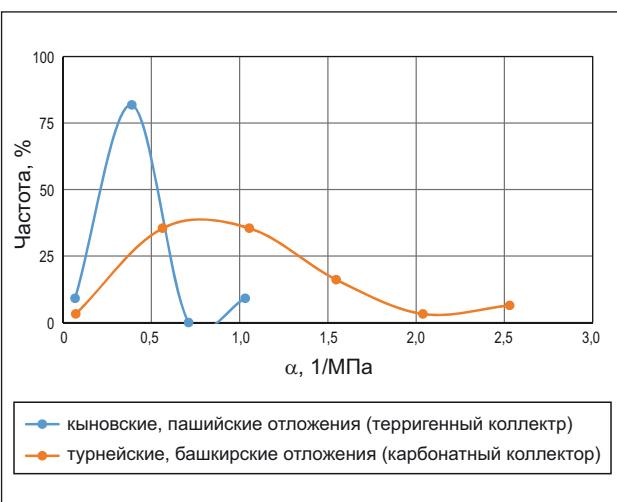


Рис. 6. Сравнение частоты распределения параметра α для терригенных и карбонатных отложений

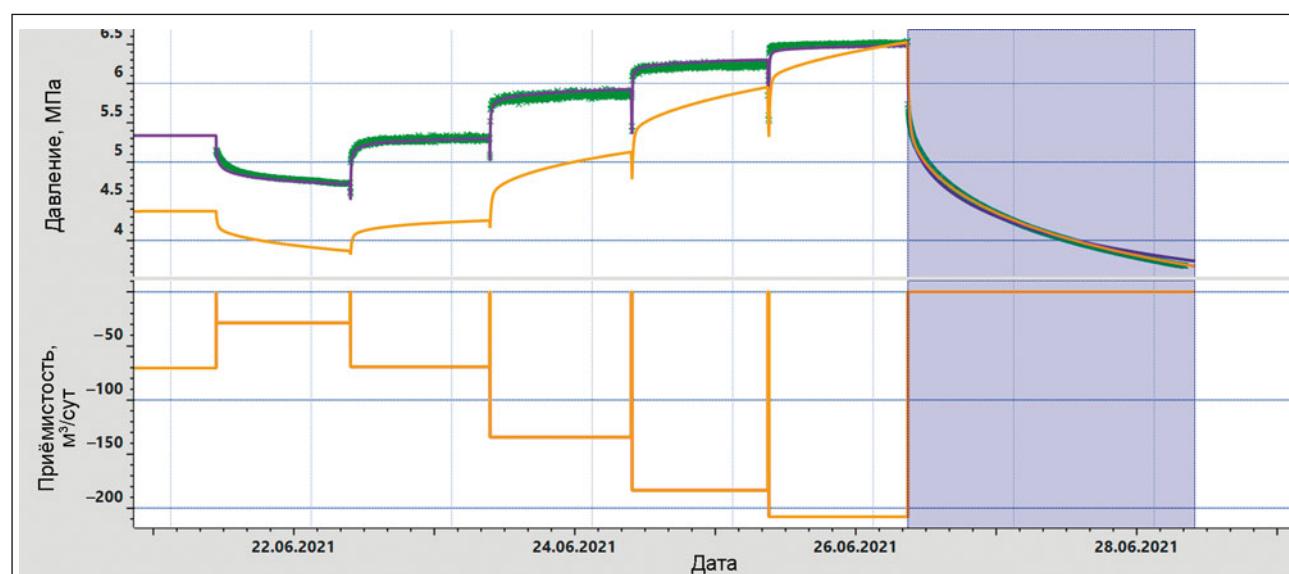


Рис. 7. Описание длительной кривой давления моделью с экспоненциальной зависимостью гидропроводности от давления (серебристый цвет) и линейной моделью (желтый цвет) карбонатных отложений (скв. 4)

Сравнение полученных параметров α для терригенных и карбонатных отложений (рис. 6) свидетельствует, что для карбонатов этот параметр в среднем принимает большие значения и имеет более существенный разброс. Это подтверждает известный тезис о том, что в трещинно-поровых коллекторах проницаемость изменяется более интенсивно по сравнению с поровыми коллекторами [15]. Однако и для терригенного коллектора, как показали исследования, параметр α имеет максимальную плотность распределения (около 0,4 МПа), что превышает данные по петрофизическим исследованиям почти на порядок. Причиной этого, скорее всего, является дополнительное влияние нелинейной деформации пласта и нелинейно-вязкой фильтрации жидкости. Поэтому в общем случае следует использовать формулу для гидропроводности $(kh/\mu)/(kh/\mu)_0 = e^{-\alpha(P-P_0)}$. В пользу данного рассуждения свидетельствует обнаруженный многими исследователями факт наличия зависимости работающей толщины от депрессии.

Использование полученных по индикаторной диаграмме параметров α позволило описать в целом кривую изменения давления (рис. 7), чего принципиально невозможно достичь, используя линейную фильтрацию.

Определение оптимальных давлений

Схожая задача решалась авторами ранее при помощи гидродинамического моделирования и применения в качестве оптимизационного критерия максимума накапленного чистого дисконтированного дохода (ЧДД). Аналогичным образом расчеты выполнены на симуляторе Rubis и для рассматриваемого случая за исключением того, что в расчетах дополнительно задавалась нелинейная фильтрация при помощи отмеченного параметра α .

Оказалось, что оптимальное давление закачки снижается с течением времени (рис. 8) или с ростом обводненности [16]. Причем для линейной фильтрации снижение происходит гораздо быстрее, чем с учетом

параметра α . С позиций экономики, учитывающей условно-переменные затраты на добычу жидкости, закачку воды, транспортировку и деэмульсацию, снижение оптимального давления закачки происходит быстрее, чем при использовании в качестве критерия максимума добычи нефти, что является очевидным [17, 18]. Поэтому на поздних стадиях разработки, когда обводненность продукции скважин велика, следует стремиться не к максимуму добычи нефти, а к максимуму ЧДД, для чего следует снижать давление закачки, приводя его к предельному.

Выводы

Таким образом, выполненные специализированные гидродинамические исследования привели к получению эмпирических формул для расчета предельного давления терригенных и карбонатных коллекторов. Обнаружено отличие определяющих параметров для средне- и глубокозалегающих коллекторов независимо от их типа. Выявлено существование довольно высоких коэффициентов экспоненциальной зависимости гидропроводности от давления по сравнению с петрофизическими исследованиями, что, вероятно, вызвано дополнительным влиянием нелинейно-вязкой фильтрации. Рассмотрены вопросы оптимальных давлений закачки. Показано, что на поздних стадиях разработки при высокой обводненности следует стремиться не к максимуму добычи нефти, а к максимуму ЧДД, снижая давление закачки и приводя его к предельным давлениям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крылов А.П. О наивыгоднейшем давлении нагнетания при законтурном заводнении // Нефт. хоз-во. – 1953. – № 12. – С. 20.
2. Опыт оптимизации работы системы поддержания пластового давления путем анализа текущей разработки нефтяного месторождения / Г.А. Бахтияров, В.Г. Волков, М.А. Фатхисламов, Р.З. Нургалиев // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 3. – С. 9–14.
3. Бакиров А.И. Совершенствование технологии извлечения нефти заводнением из карбонатных коллекторов месторождений Татарстана: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17. – Бугульма: ТатНИПИнефть, 2018. – 117 с.
4. Муслимов Р.Х. Развитие систем разработки нефтяных месторождений на страницах журнала "Нефтяное хозяйство" // Нефт. хоз-во. – 2005. – № 9. – С. 57–63.
5. Иктисанов В.А. Закономерности управления разработкой нефтяных месторождений при помощи оптимизации забойных давлений для порового коллектора // Бурение и нефть. – 2017. – № 3. – С. 14–18.
6. Хакимзянов И.Н., Музоваткин И.Н., Шамсутдинова Р.Р. Вопросы подбора оптимального давления нагнетания для небольших залежей в терригенных отложениях на примере Южно-Нурлатского месторождения с использованием геологического моделирования // Сб. науч. тр. ТатНИПИнефть. – 2022. – Вып. ХС. – С. 53.
7. Иктисанов В.А., Бобб И.Ф., Фокеева Л.Х. Последствия отклонений забойных давлений от оптимальных значений // Oil and Gas Journal Russia. – 2017. – № 8(118). – С. 60–64.

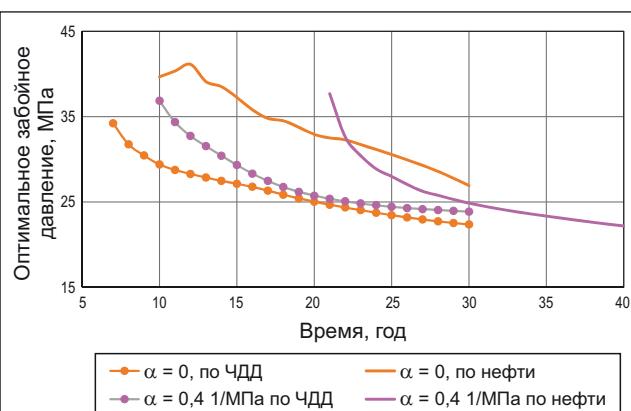


Рис. 8. Динамика оптимального давления по максимуму накапленной добычи нефти и максимуму накапленного ЧДД для терригенного коллектора (первоначальное пластовое давление 17,5 МПа)

8. Мордвинов В.А., Пономарева И.Н., Ерофеев А.А. Изменение гидродинамического состояния прискважинной зоны и продуктивности скважины при снижении пластового и забойного давлений // Оборудование и технологии для нефтяного комплекса. – 2011. – № 5. – С. 43–45.
9. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Зависимость проницаемости призабойной зоны пласта от депрессии и конструкции забоев для различных типов горных пород // Технологии ТЭК. – 2006. – № 6. – С. 59–63.
10. Мордвинов В.А., Поплыгин В.В. Изменение продуктивности добывающих скважин при снижении пластовых и забойных давлений // Нефт. хоз.-во. – 2011. – № 8. – С. 120–122.
11. Закиев Б.Ф. Исследование и обоснование методов регулирования режимов работы скважин на поздней стадии разработки нефтяного месторождения: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17. – Бугульма: ТатНИПИнефть, 2015. – 147 с.
12. Свалов А.М. Физический механизм влияния градиента давления на фильтрационные процессы в породах со смешанным типом смачиваемости // SOCAR Proceedings. – 2022. – Issue 2. – Р. 052–056.
13. Многофакторная оценка характера деформационных процессов в коллекторах при лабораторном исследовании керна / Р.Н. Диашев, К.М. Мусин, В.А. Иктисанов [и др.] // Нефт. хоз.-во. – 2001. – № 12. – С. 55–59.
14. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1970. – 239 с.
15. Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль углеводородов. – М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика"; Институт компьютерных исследований, 2006. – 780 с.
16. Лысенко В.Д., Грайфер В.И. Рациональная разработка нефтяных месторождений. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2005. – 607 с.
17. Казетов С.И., Сольева К.Ю. Экономическое обоснование оптимального забойного давления добывающей скважины // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 2(118). – С. 21–29.
18. Топольников А.С., Уразаков З.К., Утебаев А.Б. Экономическое обоснование оптимального забойного давления // Тр. НПФ "Геофизика". – 2009. – С. 167–178.
- rozhdeniy na stranitsakh zhurnala "Neftyanoe khozyaystvo" // Neft. khoz.-vo. – 2005. – № 9. – С. 57–63.
5. Иктисанов В.А. Закономерности управления разработкой нефтяных месторождений при помощи оптимизации забойных давлений для порового коллектора // Burenie i neft'. – 2017. – № 3. – С. 14–18.
6. Хакимзянов И.Н., Музоваткин И.Н., Шамсутдинова Р.Р. Вопросы подбора оптимального давления магнетанизма для небольших залежей в терригенных отложениях на примере Южно-Нурлатского месторождения с использованием геологического моделирования // Сб. науч. тр. TatNIPIneft'. – 2022. – Вып. ХС. – С. 53.
7. Иктисанов В.А., Бобб И.Ф., Фокеева Л.Х. Последствия открытия забойных давлений от оптимальных значений // Oil and Gas Journal Russia. – 2017. – № 8(118). – С. 60–64.
8. Мордвинов В.А., Пономарева И.Н., Ерофеев А.А. Изменение гидродинамического состояния прискважинной зоны и продуктивности скважины при снижении пластового и забойного давления // Оборудование и технологии для нефтяного комплекса. – 2011. – № 5. – С. 43–45.
9. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Зависимость проницаемости призабойной зоны пласта от депрессии и конструкции забоев для различных типов горных пород // Технологии ТЭК. – 2006. – № 6. – С. 59–63.
10. Мордвинов В.А., Поплыгин В.В. Изменение продуктивности добывающих скважин при снижении пластовых и забойных давлений // Нефт. хоз.-во. – 2011. – № 8. – С. 120–122.
11. Закиев Б.Ф. Исследование и обоснование методов регулирования работы скважин на поздней стадии разработки нефтяного месторождения: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17. – Bugul'ma: TatNIPIneft', 2015. – 147 s.
12. Свалов А.М. Физический механизм влияния градиента давления на фильтрационные процессы в породах со смешанным типом смачиваемости // SOCAR Proceedings. – 2022. – Issue 2. – Р. 052–056.
13. Многофакторная оценка характера деформационных процессов в коллекторах при лабораторном исследовании керна / Р.Н. Диашев, К.М. Мусин, В.А. Иктисанов [и др.] // Нефт. хоз.-во. – 2001. – № 12. – С. 55–59.
14. Dobrynin V.M. Deformatsii i izmeneniya fizicheskikh svoystv kollektorov nefti i gaza. – M.: Nedra, 1970. – 239 s.
15. Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I. Geofizicheskiy i gidrodinamicheskiy kontrol' uglevodorodov. – M.: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika"; Institut kom'yuternykh issledovaniy, 2006. – 780 s.
16. Lysenko V.D., Grayfer V.I. Ratsional'naya razrabotka neftyakh mestorozhdeniy. – M.: OOO "Nedra-Biznessentr", 2005. – 607 s.
17. Kazetov S.I., Sol'eva K.Yu. Ekonomicheskoe obosnovanie optimal'nogo zaboynogo davleniya dobivayushchey skvazhin // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov. – 2019. – № 2(118). – С. 21–29.
18. Topol'nikov A.S., Urazakov Z.K., Utebaev A.B. Ekonomicheskoe obosnovanie optimal'nogo zaboynogo давления // Tr. NPF "Geofizika". – 2009. – С. 167–178.

REFERENCES

1. Krylov A.P. O naivygodneyshem давлении магнетанизма при за-kontournom zavodnenii // Neft. khoz.-vo. – 1953. – № 12. – С. 20.
2. Opyt optimizatsii raboty sistemy podderzhaniya plastovogo давления putem analiza tekushchey razrabotki neftyanogo mestorozhdeniya / G.A. Bakhtiyarov, V.G. Volkov, M.A. Fatkhislamov, R.Z. Nurgaliev // Neftepromyslovoe delo. – 2017. – № 3. – С. 9–14.
3. Bakirov A.I. Sovrashenstvovaniya tekhnologii izvlecheniya nefti zavodneniem iz karbonatnykh kollektorov mestorozhdeniy Tatarstana: dis. ... kand. tekhn. nauk: 25.00.17. – Bugul'ma, TatNIPIneft', 2018. – 117 s.
4. Muslimov R.Kh. Razvitiye sistem razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy na stranitsakh zhurnala "Neftyanoe khozyaystvo" // Neft. khoz.-vo. – 2005. – № 9. – С. 57–63.
5. Iktisanov V.A. Zakonomernosti upravleniya razrabotkoy neftyanykh mestorozhdeniy pri pomoshchi optimizatsii zaboynykh давлений dlya porovogo kollektora // Burenie i neft'. – 2017. – № 3. – С. 14–18.
6. Khakimzhanov I.N., Muzovatkin I.N., Shamsutdinova R.R. Voprosy podbora optimal'nogo давления nagnetaniya dlya nebol'sikh zalezhey v terrigenykh otlozheniyakh na primere Yuzhno-Nurlatskogo mestorozhdeniya s ispol'zovaniem geologicheskogo modelirovaniya // Sb. nauch. tr. TatNIPIneft'. – 2022. – Вып. XC. – С. 53.
7. Iktisanov V.A., Bobb I.F., Fokeeva L.Kh. Posledstviya otkleneniy zaboynykh давлений ot optimal'nykh znacheniy // Oil and Gas Journal Russia. – 2017. – № 8(118). – С. 60–64.
8. Mordvinov V.A., Ponomareva I.N., Erofeev A.A. Izmenenie gidrodinamicheskogo sostoyaniya priskvazhinnoy zony i produktivnosti skvazhiny pri snizhennii plastovogo i zaboynogo давления // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftyanogo kompleksa. – 2011. – № 5. – С. 43–45.
9. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Zavisimost' pronitsaemosti pri-zaboynoy zony plasta ot depressii i konstruktsii zaboev dlya razlichnykh tipov gornykh porod // Tekhnologii TEK. – 2006. – № 6. – С. 59–63.
10. Mordvinov V.A., Poplygin V.V. Izmenenie produktivnosti dobivayushchikh skvazhin pri snizhennii plastovykh i zaboynykh давлений // Neft. khoz.-vo. – 2011. – № 8. – С. 120–122.
11. Zakiev B.F. Issledovanie i obosnovanie metodov regulirovaniya rezhimov raboty skvazhin na pozdney stadii razrabotki neftyanogo mestorozhdeniya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 25.00.17. – Bugul'ma: TatNIPIneft', 2015. – 147 s.
12. Svalov A.M. Fizicheskiy mekhanizm vliyaniya gradienta давления na fil'tratsionnye protsessy v porodakh so smeshannym tipom smachivaemosti // SOCAR Proceedings. – 2022. – Issue 2. – Р. 052–056.
13. Mnogofaktornaya otsenka kharaktera deformatsionnykh protsessov v kollektorakh pri laboratornom issledovanii kerna / R.N. Diyashev, K.M. Musin, V.A. Iktisanov [i dr.] // Neft. khoz.-vo. – 2001. – № 12. – С. 55–59.
14. Dobrynin V.M. Deformatsii i izmeneniya fizicheskikh svoystv kollektorov nefti i gaza. – M.: Nedra, 1970. – 239 s.
15. Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I. Geofizicheskiy i hidrodinamicheskiy kontrol' uglevodorodov. – M.: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika"; Institut kom'yuternykh issledovaniy, 2006. – 780 s.
16. Lysenko V.D., Grayfer V.I. Ratsional'naya razrabotka neftyakh mestorozhdeniy. – M.: OOO "Nedra-Biznessentr", 2005. – 607 s.
17. Kazetov S.I., Sol'eva K.Yu. Ekonomicheskoe obosnovanie optimal'nogo zaboynogo давления dobivayushchey skvazhin // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov. – 2019. – № 2(118). – С. 21–29.
18. Topol'nikov A.S., Urazakov Z.K., Utebaev A.B. Ekonomicheskoe obosnovanie optimal'nogo zaboynogo давления // Tr. NPF "Geofizika". – 2009. – С. 167–178.

Информация об авторах

Николай Александрович Смотриков, заведующий сектором
Валерий Асхатович Иктисанов, д-р техн. наук, профессор
Андрей Витальевич Байгушев, старший научный сотрудник
Ирик Галиханович Фаттахов, д-р техн. наук, профессор,
 директор по повышению нефтеотдачи пластов, волновым и
 биотехнологиям

Екатерина Анатольевна Ячменева, канд. геол.-минер. наук,
 доцент

Андрей Александрович Пименов, д-р техн. наук, директор

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 04.04.2025; принятая к публикации 14.04.2025.

Information about the authors

Nikolay A. Smotrikov, head of the Sector
Valery A. Iktisanov, DSc (engineering), Professor
Andrey V. Baygushev, senior researcher
Irik G. Fattakhov, DSc (engineering), Professor, Director of Enhanced Oil Recovery Problems, Wave and Biotechnology
Ekaterina A. Yachmeneva, PhD (geology-mineralogy), Associate professor
Andrey A. Pimenov, DSc (engineering), Director