Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/70NZVN225.pdf

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**
Рощин, П. В. Исследование изменения реологических характеристик высоковязкой нефти при взаимодействии с диоксидом углерода при газоциклической обработке пласта / П. В. Рощин, Р. Ш. Зиганшин, П. В. Склюев, М. А. Давыдов // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/70NZVN225.pdf.

**For citation:**
Roschin P.V., Ziganshin R.Sh., Sklyuev P.V., Davydov M.A. Investigation of changes in rheological characteristics of high-viscosity oil in interaction with carbon dioxide during gas cyclic treatment of the reservoir. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 70NZVN225. Available at: https://esj.today/PDF/70NZVN225.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

**УДК 622.276**

**Рощин Павел Валерьевич**
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: pv.roschin@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=699878

**Зиганшин Раис Шамильевич**
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия
Аспирант
E-mail: pauc97@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1134747

**Склюев Прокофий Витальевич**
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия
Доцент
Кандидат химических наук
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=780506

**Давыдов Михаил Анатольевич**
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия

# Исследование изменения реологических характеристик высоковязкой нефти при взаимодействии с диоксидом углерода при газоциклической обработке пласта

**Аннотация.** В настоящее время отмечается существование и эволюция устойчивого тренда на сокращение выбросов парниковых отечественных и международных нефтегазовых компаний, в том числе вертикально-интегрированных. ПАО «НК «Роснефть», Saudi Aramco и многие другие предприятия установили стратегические цели по достижению углеродной нейтральности к 2050 году. Одним из рычагов достижения данной цели являются проекты по улавливанию, использованию или захоронению диоксида углерода. Одним из способов

полезного применения диоксида углерода является возможность его закачки в нефтенасыщенные пласты с целью увеличения нефтеотдачи.

В данной работе представлены экспериментальные исследования результатов взаимодействия диоксида углерода и образца высоковязкой нефти месторождения Самарской области. Образец высоковязкой нефти был отобран с устья добывающей скважины. Измеренная вязкость нефти при пластовой температуре 26°С составляет 1043,5 мПа·с.

Ранее проведенными исследованиями было доказано отсутствие выпадения асфальтеносмолопарафиновых веществ при перемешивании данной нефти и диоксида углерода в камере высокого давления при давлении и температуре, аналогичных пластовым. По результатам однократного разгазирования пробы нефти установлено, что диоксидом углерода унесена часть легких фракций, что подтверждается увеличением вязкости оставшейся в камере исследования тяжелой фазы высоковязкой нефти в 3 раза, до 3 186,3 мПа·с. Выдвигается гипотеза о разделении при контакте с диоксидом углерода данной нефти в пласте на 2 фазы: легкую и тяжелую. Предлагается использование жидких растворителей на ароматической основе для применения на месторождении высоковязкой нефти при проведении газоциклических обработок с целью воздействия на вязкую фазу данной нефти в пластовых условиях и повышения эффективности освоения скважины после обработки.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть; добыча нефти; парниковые газы; трудноизвлекаемые запасы; диоксид углерода; углеводородный растворитель; интенсификация добычи нефти

## Актуальность

В настоящее время рядом отечественных и зарубежных нефтегазодобывающих компаний ведется деятельности по разработке мероприятий по сокращению выбросов парниковых газов.

ПАО «НК «Роснефть» установлена цель по достижению углеродной нейтральности по Областям охвата 1 и 2 к 2050 году. Углеродная нейтральность является основой для формирования стратегического видения ПАО «НК «Роснефть» [1] : оставаться надежным производителем, при этом минимизируя воздействие на климат и окружающую среду. Реализация указанной задачи планируется за счет мероприятий по сокращению выбросов, использованию низкоуглеродной генерации, развитию энергосберегающих технологий, технологий по улавливанию и хранению углерода, использованию потенциала природного поглощения, а также ряда других.

Saudi Aramco планирует реализацию проектов по улавливанию, хранению и использованию диоксида углерода (CCUS — carbon capture, utilization and storage) для достижения углеродной нейтральности к 2050 году. Exxon Mobile и другие компании также планируют развивать и использовать реализацию проектов CCS/CCUS [1; 2]. К проектам CCUS также относятся проекты по применению диоксида углерода ($CO_2$) для увеличения нефтеотдачи пластов. $CO_2$ при нормальных условиях это бесцветный газ, тяжелее воздуха. При температуре -78,3°С кристаллизуется и переходит в состояние «сухого льда».

[1] Стратегия «Роснефть-2030». URL: https://www.rosneft.ru/about/strategy (дата обращения 06.04.2025 г.).

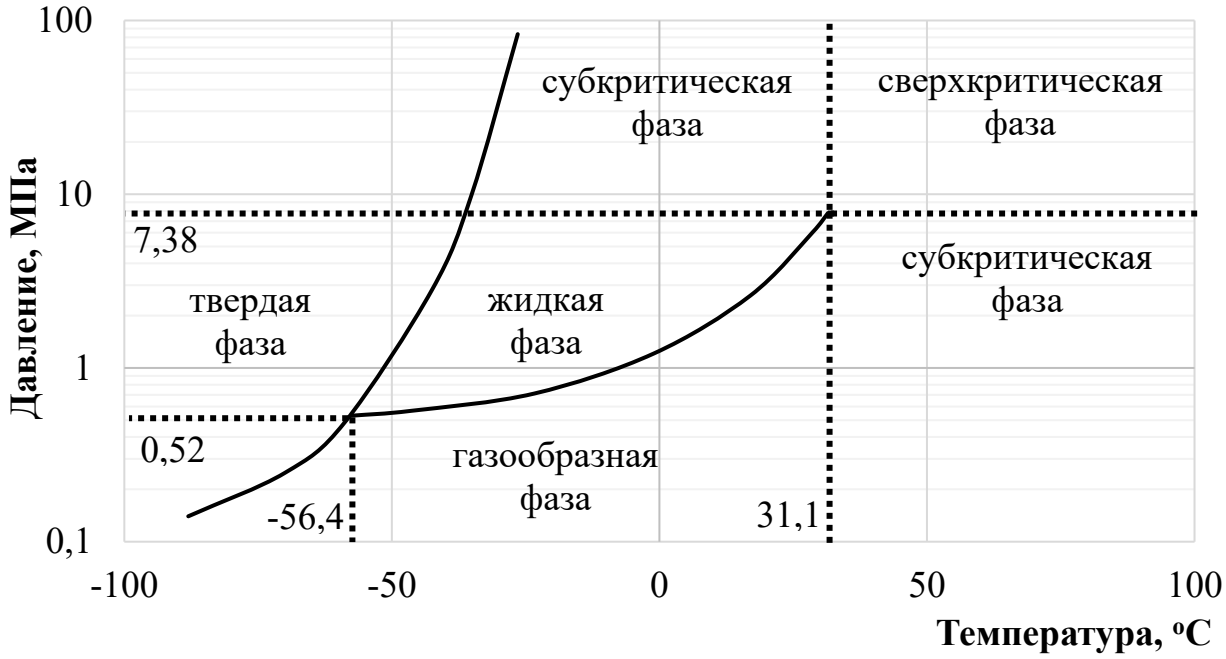


***Рисунок 1.*** *Фазовые состояния диоксида углерода (составлено авторами)*

Диоксид углерода имеет ряд полезных для увеличения нефтеотдачи пластов свойств. Во-первых, нефть при растворении в ней диоксида углерода, склонная к увеличению объема, «набуханию», что положительно влияет на вытесняющие свойства $CO_2$. Он способен снижать вязкость нефти при растворении в ней и снижать поверхностное натяжение нефти на границе с водой в условиях нефтяных пластов.

Проекты по применению $CO_2$ для увеличения нефтеотдачи пластов начинались как лабораторные и промысловые эксперименты по газоциклической обработке (Huff-n-Puff) скважин еще в 1970-х. Одно из первых упоминаний о данной технологии приводится в публикации Американского общества инженеров-нефтяников «Performance of the Twofreds $CO_2$ Injection Project» (SPE 14439). Эти опытные испытания дали начало масштабному применению технологии по всему миру. В ранее опубликованной авторами данной статьи работе представлены данные по усредненным приростам добычи нефти после проведения газоциклических обработок добывающих нефтяных скважин: в среднем в мире 1,39 т/т (за исключением Тринидада и Тобаго), в России — 5,26 т/т [3].

Отмечается, что именно газоциклические обработки продуктивного пласта позволяют выполнить оценку потенциала полномасштабного применения диоксида углерода для закачки на постоянной основе в качестве третичного метода увеличения нефтеотдачи продуктивного пласта [4–10]. Особенно актуально применение данной технологии для освоения трудноизвлекаемых запасов высоковязкой нефти и природного битума [4–6].

Целью данной работы является исследование реологических свойств нефти до и после взаимодействия с диоксидом углерода в условиях, приближенных к пластовым, а также формирование гипотезы о динамике работы добывающей скважины при газоциклической обработке.

Экспериментальные исследования были проведены в лаборатории кафедры разработки нефтяных и газовых месторождений Самарского государственного технического университета.

## Методы

Устьевая проба высоковязкой нефти была отобрана на одном из месторождений Самарской области в 2025 году. Образец нефти был подготовлен к исследованиям согласно ОСТ 153-39.2-048-2003 «Нефть. Типовое исследование пластовых флюидов и сепарированных нефтей». Состав и физические свойства нефти представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Состав и физические свойства образца высоковязкой нефти**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Пластовое давление, МПа | 10,13 |
| Агрегатное состояние углекислого газа в указанных условиях | жидкость |
| Пластовая температура, °С | 26 |
| **Содержание, % масс.** | |
| — Смолы | 18,74 |
| — Асфальтены | 8,2 |
| — Парафины | 3,7 |
| Отношение массы смол к массе асфальтенов, ед. | 2,28 |
| Плотность в пластовых условиях, кг/м$^3$ | 948 |
| Вязкость в пластовых условиях, мПа·с | 580,2 |
| Наличие совместимости устьевой пробы нефти с диоксидом углерода при пластовом давлении и температуре | Да.<br>Подтверждается экспериментальными исследованиями авторов данной работы в 2024 году |

*Составлено авторами*

В ранее опубликованной научной работе «Выбор скважин-кандидатов для циклической обработки углекислым газом: исследование совместимости нефти и углекислого газа» представлены результаты исследования взаимодействия образца данной высоковязкой нефти с диоксидом углерода при пластовых температуре и давлении. Исследования были проведены на самостоятельно разработанном группой специалистов (Рощин П.В., Давыдов М.А., Зиганшин Р.Ш., Никитин А.В., Маргачев Д.А.) оборудовании, которое далее в данной работе будет наименоваться как «СКФ-камера».

СКФ-камера обеспечивает возможность визуального наблюдения за процессами, происходящими внутри установки. Имеется возможность применения источников подсветки различного цветового спектра, в том числе ультрафиолетовый свет. Данное оборудование может применяться для различных видов исследований:

- исследование взаимодействия устьевых и пластовых проб нефти с диоксидом углерода;
- исследование взаимодействия устьевых и пластовых проб воды с диоксидом углерода;
- исследование взаимодействия реагентов, применяемых при добыче и транспортировке нефти, и диоксида углерода (поверхностно-активные вещества, растворы полимеров, ингибиторы коррозии, деэмульгаторы, ингибиторы отложения асфальтеносмолопарафиновых веществ, реагенты-растворители и много другое);
- иные PVT-исследования, требующие создание определенного давления и температуры и визуального наблюдения за процессами.

На рисунках 2 и 3 представлены схемы соединения СКФ-камеры с насосным оборудованием, а также сборка светодиодной подсветки с проходящим светом для возможности наблюдения процессов внутри камеры.

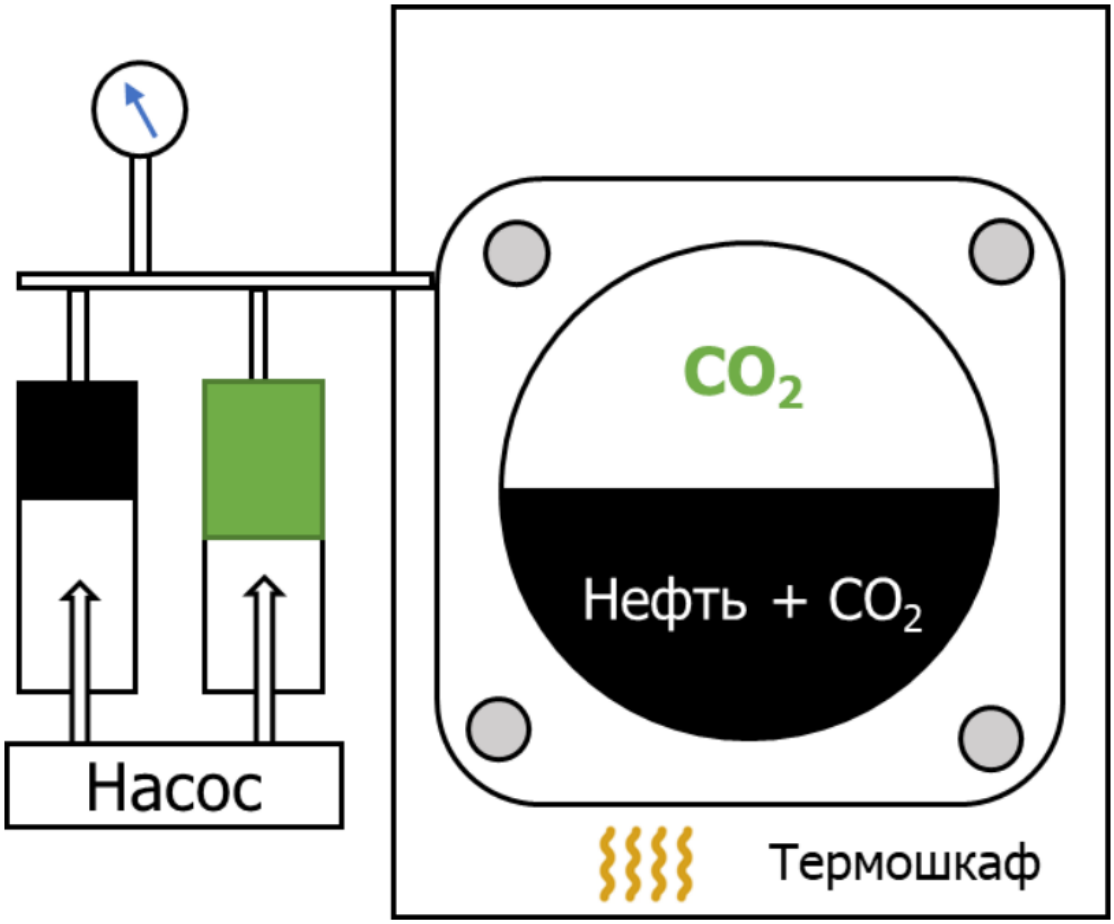


***Рисунок 2.*** *Концептуальная схема установки для проведения PVT-исследований с использованием СКФ-камеры в сборе (составлено авторами)*

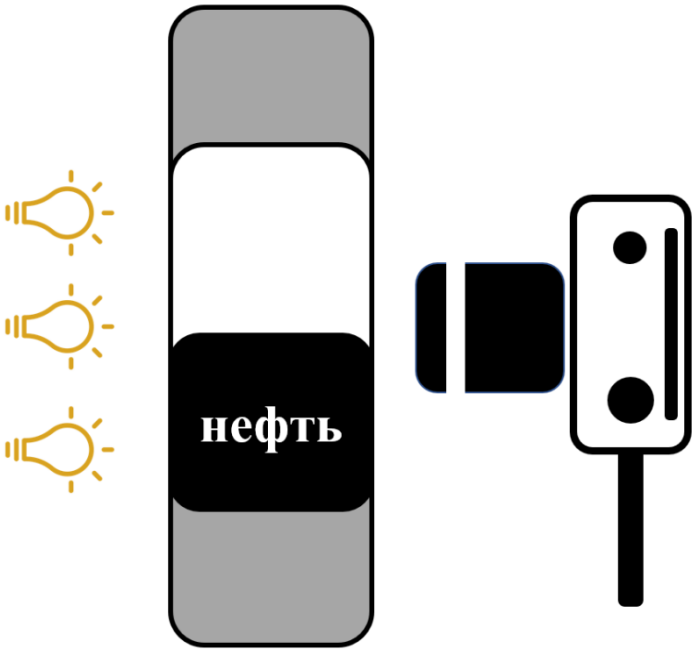


***Рисунок 3.*** *Сборка системы визуального наблюдения и фиксации результатов исследования в СКФ-камере путем применения цифровой фотовидеокамеры и светодиодной подсветки (составлено авторами)*

Для изучения реологических свойств образца высоковязкой нефти до и после проведения исследований по взаимодействию нефти и углекислого газа применялся цифровой ротационный вискозиметр. Авторами данной работы также изучен опыт отечественных исследований реологических свойств высоковязкой нефти [12–15].

Эксперимент по исследованию взаимодействия образца высоковязкой нефти и $CO_2$ проводился в три этапа.

Этап 1. Выполнялась загрузка подготовленного образца высоковязкой нефти в «аккумуляторы» (контейнеры с разделительным поршнем для перевода флюидов в СКФ-камеру) блока подачи флюидов для исследования в СКФ-камере. Также производилась загрузка достаточного объема диоксида углерода в другой «аккумулятор» блока подачи флюидов. СКФ-камера была помещена в термошкаф и подключена к линии подачи флюидов (и контроля давления), и термостатировалась до температуры 26°C в термошкафу (не менее 1 часа). Линия подачи СКФ-камеры подключалась к баллону с диоксидом углерода (в газообразном состоянии) и выполнялся сквозной продув через 2 порта для удаления из нее атмосферного воздуха.

Этап 2. С использованием линии подачи флюидов СКФ-камера заполнялась нефтью, а затем диоксидом углерода в соотношении «нефть — диоксид углерода» на менее 1 к 3. Выполнялась термостабилизация и активное перемешивание нефти и диоксида углерода внутри «СКФ-камеры».

Этап 3. Фотографирование и визуальное наблюдение результатов взаимодействия нефти и диоксида углерода при давлении 10,13 МПа и температуре 26°C. По завершении данного этапа было выполнено однократное снижение давления в СКФ-камере до атмосферного в течение примерно 1 часа. Отмечалось визуальное наблюдение уноса легких фракций, слабое образование пузырьков на поверхности нефти при снижении давления в СКФ-камере. Затем образец нефти был извлечен из СКФ-камеры и помещен в ротационный вискозиметр для исследования его реологических свойств после воздействия $CO_2$ при температуре 26°C и атмосферном давлении.

На рисунке 4 представлена фотография стекла «СКФ-камеры» с пленкой нефти без визуальных признаков выпадения асфальтеносмолопарафиновых веществ. Данное исследование было проведено ранее в 2024 году с образцом высоковязкой нефти с этого же объекта.

***Рисунок 4.*** *Фото стекла СКФ-камеры. Отсутствие выпадения асфальтеносмолопарафиновых веществ при взаимодействии диоксида углерода и устьевой пробы нефти при PVT-условиях данного пласта (составлено авторами)*

Исследование реологических свойств нефти до и после взаимодействия с $CO_2$ было проведено следующим образом. Образец нефти помещен в ротационный вискозиметр, проба и измерительные элементы были термостатированы до температуры 26°C (пластовая температура на данном объекте). Ротационный вискозиметр был переведен в режим «контролируемая скорость сдвига», остальные величины включая динамическую вязкость, напряжение сдвига, являлись зависимыми. Время исследования составило 300 секунд, количество точек записи данных — 100.

## Результаты

На рисунке 5 представлены результаты исследований в виде двух кривых течения нефти, где представлена зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для образцов нефти до и после эксперимента по взаимодействию с диоксидом углерода в СКФ-камере.

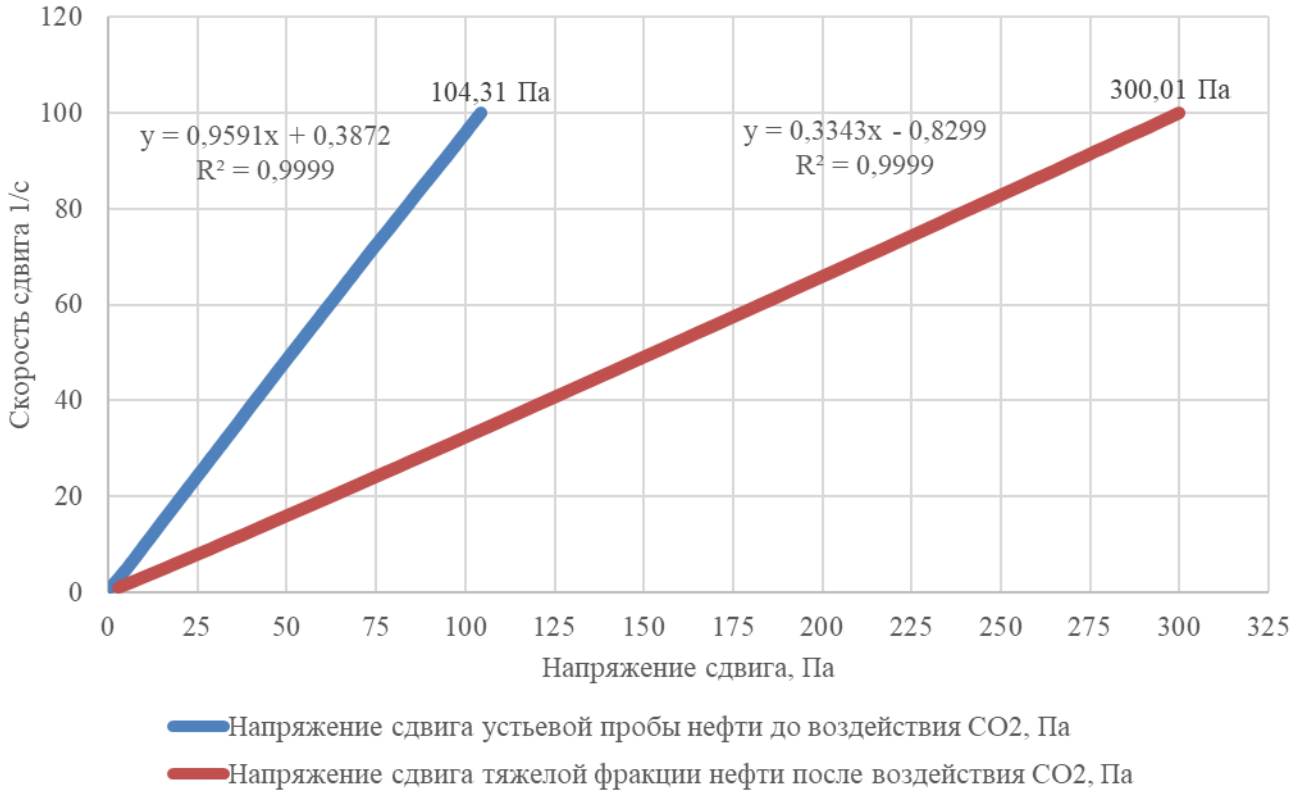


***Рисунок 5.*** *Кривые течения при 26 °C: устьевой пробы высоковязкой нефти до взаимодействия с диоксидом углерода в СКФ-камере; тяжелой фракции (нефти) после взаимодействия высоковязкой нефти с диоксидом углерода в СКФ-камере и однократном разгазировании (составлено авторами)*

Как видно из представленного графика, на всем интервале линейного увеличения скорости вращения ротора ротационного вискозиметра отмечается пропорциональное увеличение напряжения сдвига. Напряжение сдвига нефти (тяжелая фракция) после воздействия $CO_2$ в 3 раза выше практически на всем интервале скорости вращения ротора, чем напряжение сдвига нефти до воздействия $CO_2$. Согласно визуальным наблюдениям разгазирования в СКФ-камере, это может объясняться уносом легких фракций нефти при снижении давления в СКФ-камере до атмосферного. Данный процесс подлежит отдельным исследованиям, которые будут представлены в дальнейших публикациях.

Проведенными исследованиями при 26°С также установлено увеличение динамической вязкости пробы нефти, пребывавшей во взаимодействии с $CO_2$, относительно исходной устьевой пробы нефти. При скорости сдвига 5 $с^{-1}$ динамическая вязкость исходной пробы нефти составила 1 043,5 мПа·с, а динамическая вязкость пробы нефти после взаимодействия с $CO_2$ и последующем разгазировании составила 3 186,3 мПа·с. Таким образом, динамическая вязкость нефти (тяжелая фракция) после взаимодействия с $CO_2$ и последующем однократном разгазировании увеличилась в 3 раза, что может объясняться уносом легких фракций вместе с $CO_2$.

## Обсуждение

Авторами данной работы выдвигается следующая гипотеза. Для данного объекта представленный процесс, смоделированный в СКФ-камере, может рассматриваться как моделирование газоциклической обработки скважины на данном месторождении с последующим интенсивным освоением на максимальной депрессии на пласт после выдерживания скважины на пропитку с $CO_2$. Таким образом, в области пласта-коллектора затронутой закачкой $CO_2$ вокруг добывающей скважины, может формироваться двухфазный поток: фильтрация легкой фракции нефти (увлекаемой движением диоксида углерода) с одновременной фильтрацией тяжелой фракции нефти. При интенсивном освоении и эксплуатации скважины после газоциклической обработки $CO_2$ с высокой депрессией на пласт, это может привести к первому этапу работы скважины «легкой нефтью» (точнее, ее более легкой фазой) с постепенным увеличением вязкости добываемой нефти за счет снижения со временем доли легкой нефти ввиду ее опережающего извлечения. После завершения извлечения легкой фазы на первом этапе может быть выделен второй этап, когда более вязкая, тяжелая фаза начинает поступать на забой и в насосное оборудование добывающей скважины, в связи с чем дебит может снизиться (рис. 6). Эта оторочка вязкой фазы может фильтроваться в дальнейшем совместно с исходной пластовой нефтью, также формируя двухфазный поток в поровом пространстве пласта-коллектора в районе добывающей скважины. По завершении извлечения более тяжелой фазы высоковязкой нефти, пребывавшей в контакте с $CO_2$, скважина будет продолжать работу уже обычной пластовой нефтью.

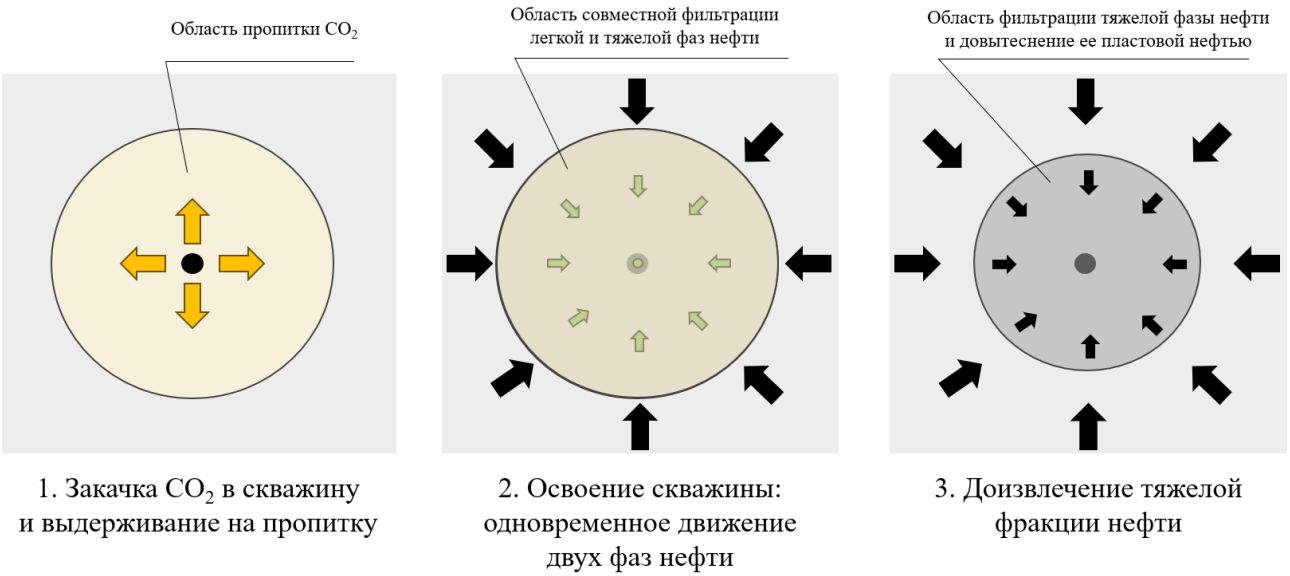


***Рисунок 6.*** *Гипотеза о состояниях призабойной зоны пласта скважины с исследованной нефтью при проведении газоциклической обработки (составлено авторами)*

Таким образом, задача воздействия на тяжелую фракцию данной высоковязкой нефти при газоциклической обработке добывающей скважины диоксидом углерода является актуальной. Одним из возможных вариантов управления реологическими свойствами тяжелой фракции нефти является закачка реагентов-растворителей на углеводородной основе с высоким содержанием ароматических углеводородов в составе растворителя с формированием оторочки вокруг добывающей скважины. Затем уже возможно вести закачку диоксида углерода и последующее выдерживание на пропитку. Это позволит осуществить растворение и регулирование реологических свойств тяжелых компонентов высоковязкой нефти.

В публикации «Разработка комплексной технологии применения композиционного растворителя» (авторы В.И. Дарищев, А.А. Широков, С.В. Цветков, ООО «РИТЭК») описана возможность применения растворителей на основе собственной пентан-гексановой фракции [5]. Отмечается эффективность закачки оторочки реагентов-растворителей перед закачкой $CO_2$.

В научной работе «Effect of light hydrocarbon solvents on the performance of $CO_2$-based cyclic solvent injection (CSI) in heavy oil systems» (Arash Ahadi, Farshid Torabi, Университет Регина, Канада) представлены данные по лабораторному моделированию циклической обработки на насыпной модели керна с образцом нефти вязкостью 783,92 мПа·с [16]. Содержание асфальтенов в нефти составляло 13,61 % масс. В качестве комплексного реагента-растворителя использовались смеси метана ($CH_4$) и пропана ($C_3H_8$) в различных концентрациях совместно с диоксидом углерода ($CO_2$). После закачки растворителя в нефтенасыщенную модель пласта, система выдерживалась 24 часа при температуре 20°C, циклы повторялись несколько раз на одной и той же модели с давлением закачки от 4,82 до 1,72 МПа. Согласно проведенным исследованиям по лабораторному моделированию газоциклической обработки установлено, что смесь диоксида углерода и пропана способствует выпадению асфальтенов в поровом пространстве модели. Закачка чистого диоксида углерода также способствовала выпадению асфальтенов в модели.

Авторами данной работы предлагается использование жидких растворителей на ароматической основе для применения на месторождениях высоковязкой нефти при проведении газоциклических обработок. Применение жидких реагентов-растворителей при закачке $CO_2$ может быть более целесообразно, чем сопутствующая закачка углеводородных газов, ввиду простоты хранения, транспортировки и закачки в скважины на промысле.

Таким образом, на основе лабораторных и теоретических исследований возможно сделать следующие выводы.

1. Выполненное ранее исследование взаимодействия представленного в работе образца высоковязкой нефти Самарской области и диоксида углерода в PVT-условиях, приближенных к пластовым (давление 10,13 МПа, температура 26°C), позволяет сделать вывод об отсутствии визуально наблюдаемого процесса выпадения асфельтеносмолопарафиновых веществ.

2. Выполненное в СКФ-камере физическое моделирование интенсивного освоения скважины после проведения газоциклической обработки $CO_2$ приводит к уносу легких фракций нефти и, соответственно, изменению реологических свойств оставшейся тяжелой фракции нефти. Проведенными исследования на ротационном вискозиметре установлено, что вязкость тяжелой фракции нефти при пластовой температуре 26°C превышает вязкость исходной устьевой пробы нефти в 3 раза.

3. На основании проведенных исследований представлена гипотеза о динамике работы скважины на данном объекте после проведения газоциклической обработки $CO_2$. Для управления реологическими свойствами высоковязкой нефти и снижением вязкости тяжелой фазы нефти в поровом пространстве рекомендовано применение жидких углеводородных растворителей на ароматической основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рощин П.В., Парамзин А.Р., Савельев А.А., Логинов А.А., Огородникова Е.М., Канайкин И.Е., Бодоговский Н.С., Рашевская Ю.А., Давыдов М.А., Зиновьев А.М., Никитина К.М., Гилаев Г.Г. Сокращение выбросов парниковых газов: стратегия и методы декарбонизации нефтегазовых компаний. Нефть. Газ. Новации. 2024. № 7(284). С. 11–15.
2. Зиганшин, Р.Ш. Перспективы применения углекислого газа в современной промышленной энергетике / Р.Ш. Зиганшин, Д.А. Маргачев, М.А. Давыдов, А.М. Зиновьев // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/16NZVN522.pdf.
3. Зиганшин, Р.Ш. Обзор мирового опыта применения технологии газоциклической обработки нефтедобывающих скважин углекислым газом для увеличения добычи нефти / Р.Ш. Зиганшин, П.В. Рощин, А.А. Рязанов, А.М. Зиновьев, Г.А. Ковалева, П.В. Склюев, М.А. Давыдов // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 1. — URL: https://esj.today/PDF/43NZVN124.pdf.
4. Дарищев В.И., Харланов С.А., Бабинец Ю.И., Зиновьев А.В., Антонова Д.О. Реализация технологии закачки CO2 HUFF&PUFF как метода интенсификации добычи высоковязкой нефти. Бурение и нефть. 2023. № 3. С. 18–23.
5. Дарищев В.И., Харланов С.А., Халиулов А.А., Бабинец Ю.И., Зиновьев А.В., Антонова Д.О. Разработка комплексной технологии применения композиционного растворителя. Нефть. Газ. Новации. 2023. № 5(270). С. 56–59.
6. Дарищев В.И., Харланов С.А., Бабинец Ю.И., Зиновьев А.В., Антонова Д.О. Опытно-промышленные работы по использованию углекислого газа для интенсификации добычи высоковязкой нефти. Нефть. Газ. Новации. 2022. № 2(255). С. 29–34.
7. Shilov E. et al. Huff-n-puff experimental studies of $CO_2$ with heavy oil // Energies. — 2019. — Т. 12. — № 22. — С. 4308.
8. Лобанов А.А., Щеколдин К.А., Звонков М.А., Хлань М.В., Пустова Е.Ю., Коваленко В.А., Стручков И.А., Золотухин А.Б. Особенности взаимодействия сжиженного углекислого газа с высоковязкой нефтью. Часть I: Объемное и фазовое поведение смесей. // Нефтепромысловое дело. — 2018 — № 4 — С. 24–30. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32734341.
9. Лобанов А.А., Щеколдин К.А., Звонков М.А., Хлань М.В., Пустова Е.Ю., Коваленко В.А., Стручков И.А., Золотухин А.Б. Особенности взаимодействия сжиженного углекислого газа с высоковязкой нефтью. Часть II: Свойства фаз. // Нефтепромысловое дело. — 2018 — № 5 — С. 47–53. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=34883004.
10. Лобанов А.А., Щеколдин К.А., Звонков М.А., Хлань М.В., Пустова Е.Ю., Коваленко В.А., Стручков И.А., Золотухин А.Б. Особенности взаимодействия сжиженного углекислого газа с высоковязкой нефтью. Часть III: Седиментация сложных структурных единиц системы. // Нефтепромысловое дело. — 2018 — № 6 — С. 21–30. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35101568.
11. Парамзин, А.Р. Современное состояние мировых запасов высоковязкой нефти и природного битума / А.Р. Парамзин, А.М. Зиновьев, И.Е. Канайкин [и др.] // Вестник Евразийской науки. — 2024. — Т 16. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/08NZVN224.pdf (дата обращения: 01.04.2025).

12. Рогачев М.К., Колонских А.В. Исследование вязкоупругих и тиксотропных свойств нефти Усинского месторождения // Нефтегазовое дело. — 2009. — Т. 7. — № 1. — С. 37–42. EDN: KXEJJT.

13. Рогачев М.К., Кондрашева Н.К. Реология нефти и нефтепродуктов. — Уфа: УГНТУ, 2000. — 85 с. — EDN: YSEVMY.

14. Девликамов В.В., Рогачев М.К. Влияние ПАВ на реологические свойства нефти. // Нефтяное хозяйство. — 1976. — № 7 — С. 29–31.

15. Девликамов В.В., Зейгман Ю.В., Кабиров М.М., Рогачев М.К., Хабибуллин З.А. Проблемы реологии нефти и повышения нефтеотдачи. // Нефтепромысловое дело. — 1983 — № 12. — С. 2–4.

16. Ahadi A., Torabi F. Effect of light hydrocarbon solvents on the performance of $CO_2$-based cyclic solvent injection (CSI) in heavy oil systems // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2018. — Т. 163. — С. 526–537.

**Roschin Pavel Valerevich**
Samara State Technical University, Samara, Russia
E-mail: pv.roschin@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=699878

**Ziganshin Rais Shamilevich**
Samara State Technical University, Samara, Russia
E-mail: pauc97@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1134747

**Sklyuev Prokofiy Vitalievich**
Samara State Technical University, Samara, Russia
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=780506

**Davydov Mikhail Anatolievich**
Samara State Technical University, Samara, Russia

# Investigation of changes in rheological characteristics of high-viscosity oil in interaction with carbon dioxide during gas cyclic treatment of the reservoir

**Abstract.** Currently, there is a stable trend towards reducing greenhouse emissions from domestic and international oil and gas companies, including vertically integrated ones, and its evolution is observed. Rosneft Oil Company, Saudi Aramco and many other companies have set strategic goals to achieve carbon neutrality by 2050. One of the levers for achieving this goal is projects to capture, use or bury carbon dioxide. One of the ways to use carbon dioxide is to inject it into oil-saturated formations to increase oil recovery.

This paper presents experimental studies of the results of interaction between carbon dioxide and heavy oil sample from a field in the Samara Region. The heavy oil sample was collected from the top flange of production well. The measured viscosity of heavy oil at a reservoir temperature of 26°C is 1 043,5 mPa·s. Previously conducted studies have proven the absence of precipitation of asphaltene-resin-paraffin substances when mixing this oil and carbon dioxide in a high-pressure chamber at a pressure and temperature similar to those in the reservoir. Based on the results of a single degassing of an oil sample, it was found that some of the light fractions were carried away by carbon dioxide, which is confirmed by a 3-fold increase in the viscosity of the heavy phase of the high-pressure chamber remaining in the high-pressure chamber, up to 3 186,3 mPa·s. A hypothesis is put forward about the separation of this high-pressure chamber in the reservoir into 2 phases upon contact with carbon dioxide: light and heavy. It is proposed to use liquid aromatic solvents for application at the high-pressure chamber field during gas-cyclic treatments in order to influence the viscous phase of this oil under reservoir conditions and to increase the efficiency of well development after treatment.

**Keywords:** heavy oil; oil production; greenhouse gases; hard to recover reserves; carbon dioxide; hydrocarbon solvent; enhanced oil recovery