

УДК 622.276

DOI: 10.31660/0445-0108-2023-6-78-87

## Механизмы взаимодействия CO<sub>2</sub> с пластовой нефтью

А. Г. Хакимов<sup>1\*</sup>, Н. А. Еремин<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

\*a.g.khakimov@gmail.com

**Аннотация.** Основная цель статьи заключается в детальном рассмотрении механизмов смешивающегося и несмешивающегося взаимодействия CO<sub>2</sub> с нефтью. Исследование направлено на выявление влияния этих механизмов на физические свойства нефти, эффективность извлечения и параметры нефтяных пластов. Это позволит получить более глубокое понимание влияния этих процессов на нефтедобычу и углеродное управление. Статья использует аналитический подход для анализа процессов растворения CO<sub>2</sub> в нефти, изменений физических свойств и механизмов вытеснения нефти в поровом пространстве. В статье используются результаты лабораторных исследований взаимодействия CO<sub>2</sub> с нефтью. Исследование выявляет, как смешивающееся взаимодействие CO<sub>2</sub> с нефтью может изменять физические свойства нефти, улучшая ее текучесть и эффективность извлечения. Анализ несмешивающегося взаимодействия позволяет понять механизмы вытеснения нефти и оптимизировать этот процесс. Работа имеет практическую значимость для нефтедобычи и углеродного управления, предоставляя данные для разработки более эффективных технологий и методов добычи.

**Ключевые слова:** несмешивающееся взаимодействие, углеродное управление, смешивающееся взаимодействие, поровое пространство, углекислый газ

**Для цитирования:** Хакимов, А. Г. Механизмы взаимодействия CO<sub>2</sub> с пластовой нефтью / А. Г. Хакимов, Н. А. Еремин. – DOI 10.31660/0445-0108-2023-6-78-87 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 6. – С. 78–87.

## Mechanisms of interaction of CO<sub>2</sub> with reservoir oil

Alisher G. Khakimov<sup>1\*</sup>, Nikolai A. Eremin<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Oil and Gas Research Institute of RAS, Moscow, Russia

\*a.g.khakimov@gmail.com

**Abstract.** The article aims to examine the mechanisms of miscible and immiscible interaction of CO<sub>2</sub> with oil in detail. The study aims to investigate the effects of these mechanisms on the physical properties of oil, recovery efficiency, and oil reservoir parameters. This will enhance our understanding of the impact of these processes on oil production and carbon management. The article takes an analytical approach to examine the processes of CO<sub>2</sub> dissolution in oil, changes in physi-

cal properties, and mechanisms of oil displacement in the pore space. The study utilises the results of laboratory experiments on the interaction of CO<sub>2</sub> with oil. It reveals how the miscible interaction of CO<sub>2</sub> with oil can alter the physical properties of oil, enhancing its flowability and recovery efficiency. An analysis of immiscible interactions enables us to comprehend the mechanisms of oil displacement and optimize the process. The work is relevant to oil production and carbon management, providing data for the development of more efficient production technologies and methods.

*Keywords:* immiscible interaction, carbon management, miscible interaction, pore space, carbon dioxide

*For citation:* Khakimov, A. G., & Eremin, N. A. (2023). Mechanisms of interaction of CO<sub>2</sub> with reservoir oil. *Oil and Gas Studies*, (6), pp. 78-87. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2023-6-78-87

## **Введение**

Взаимодействие углекислого газа (CO<sub>2</sub>) с нефтью представляет собой важную тему в нефтяной промышленности и углеродном управлении. Суть этого взаимодействия может проявляться в двух основных режимах: смешивающемся и несмешивающемся. В данной статье мы рассмотрим эти два механизма и исследования, связанные с ними, а также рассмотрим их практическое значение для нефтедобычи и углеродного управления.

### ***Смешивающееся взаимодействие CO<sub>2</sub> с нефтью***

Смешивание CO<sub>2</sub> с нефтью — это процесс, при котором молекулы CO<sub>2</sub> интегрируются в структуру нефтяных молекул. Этот механизм играет ключевую роль в различных аспектах нефтедобычи и углеродного управления.

- Растворение и изменение физических свойств нефти: CO<sub>2</sub> может растворяться в нефти, что приводит к изменению ее физических свойств. Исследования показывают, что это включает в себя увеличение объема нефти и снижение ее вязкости [1]. Такие изменения могут улучшать текучесть нефти и способствовать ее более эффективной добыче.

- Эффективность извлечения нефти: исследователи также изучают влияние смешивания CO<sub>2</sub> с нефтью на эффективность извлечения. Этот процесс может помочь перемещать нефть к скважине, что способствует увеличению добычи [2].

Смешивающееся взаимодействие углекислого газа (CO<sub>2</sub>) с нефтью представляет собой процесс, в ходе которого молекулы CO<sub>2</sub> интегрируются в структуру нефтяных молекул, что может оказать существенное воздействие на физические и химические свойства нефти в пластовых условиях. Этот механизм имеет важное значение как в контексте нефтедобычи, так и углеродного управления. Давайте более подробно рассмотрим смешивающееся взаимодействие CO<sub>2</sub> с нефтью.

*Растворение CO<sub>2</sub> в нефти.* Главной характеристикой смешивающегося взаимодействия CO<sub>2</sub> с нефтью является растворение CO<sub>2</sub> в молекулах нефти. Этот процесс может изменить химический состав нефти и привести к образованию углеводородных соединений, содержащих атомы углерода

из  $\text{CO}_2$ . Важно отметить, что растворение  $\text{CO}_2$  в нефти может изменяться в зависимости от давления, температуры и состава нефти.

*Изменение физических свойств нефти.* Смешивание  $\text{CO}_2$  с нефтью вызывает изменения в физических свойствах нефти. Одним из наиболее заметных изменений является увеличение объема нефти [3]. Это происходит из-за включения молекул  $\text{CO}_2$  в структуру нефтяных молекул. Увеличение объема нефти может вызвать перепад давления в поровом пространстве, что, в свою очередь, может вытеснить нефть из пор.

*Снижение вязкости нефти.* Растворение  $\text{CO}_2$  также влияет на вязкость нефти. В результате взаимодействия  $\text{CO}_2$  с нефтью вязкость снижается. Это означает, что нефть становится менее густой и более подвижной, что может значительно улучшить ее способность к течению. Снижение вязкости является одним из ключевых факторов, способствующих увеличению добычи нефти из сложных и тяжелых нефтяных месторождений [4].

*Практическое применение.* Смешивающееся взаимодействие  $\text{CO}_2$  с нефтью находит применение в нефтедобыче и углеродном управлении. Например, процесс закачки  $\text{CO}_2$  может использоваться для увеличения добычи нефти из сложных пластов, таких как тяжелые нефти и месторождения с высокой вязкостью [5]. Этот процесс может также содействовать улучшению углеродного управления путем захвата  $\text{CO}_2$  и его хранения в подземных образованиях.

#### ***Несмешивающееся взаимодействие $\text{CO}_2$ с нефтью***

В отличие от смешивающегося взаимодействия, несмешивающееся взаимодействие характеризуется тем, что  $\text{CO}_2$  и нефть остаются разделенными. В этом случае молекулы  $\text{CO}_2$  могут вытеснять нефть из порового пространства пласта.

- Механизм вытеснения нефти: исследования в этой области уделяют внимание процессу вытеснения нефти из пор под действием  $\text{CO}_2$ . Он зависит от множества факторов, включая давление, температуру и свойства породы. Эффективность этого механизма определяется какими-либо адсорбционными и дисперсионными свойствами пласта [3].

Несмешивающееся взаимодействие углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) с нефтью представляет собой процесс, при котором  $\text{CO}_2$  и нефть остаются разделенными фазами в пласте и  $\text{CO}_2$  выступает в роли агента, который выталкивает нефть из порового пространства. Этот механизм имеет важное значение в нефтедобыче и углеродном управлении. Давайте подробнее рассмотрим несмешивающееся взаимодействие  $\text{CO}_2$  с нефтью.

#### ***Механизм вытеснения нефти***

- Процесс несмешивающегося взаимодействия начинается с инъекции  $\text{CO}_2$  в пласт, содержащий нефть.  $\text{CO}_2$ , будучи легче нефти, стремится подняться в поровом пространстве.

- В результате этого движения  $\text{CO}_2$  оказывает давление на нефть, выталкивая ее из пор. Этот процесс может сильно улучшить извлечение нефти из пласта.

- Эффективность механизма вытеснения зависит от различных факторов, таких как свойства породы, давление, температура и вязкость нефти. Исследователи изучают эти параметры, чтобы оптимизировать процесс вытеснения [6].

#### *Моделирование и численные расчеты*

- Многие исследования в области несмешивающегося взаимодействия  $\text{CO}_2$  и нефти включают численное моделирование для прогнозирования поведения нефти и  $\text{CO}_2$  в пласте. Это позволяет оценить, как изменения параметров влияют на эффективность вытеснения и определить оптимальные условия для процесса.

#### *Практическое применение*

- Несмешивающееся взаимодействие  $\text{CO}_2$  с нефтью широко применяется в промышленности для увеличения добычи нефти, особенно из месторождений, где нефть имеет высокую вязкость или находится в пластах с низкой проницаемостью.

- Этот процесс также используется в углеродном управлении для захвата и хранения углерода (CCS). Закачка  $\text{CO}_2$  в геологические образования, такие как пустые скважины или солевые каверны, может привести к захвату  $\text{CO}_2$  и предотвращению его выброса в атмосферу.

Выбор между смешивающимся и несмешивающимся взаимодействием углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) с нефтью зависит от конкретных условий месторождения, целей добычи и углеродного управления, а также технической и экономической целесообразности. Давайте рассмотрим, в каких условиях удобнее применять каждый из этих процессов.

### **Недостатки**

#### *Недостатки смешивающегося взаимодействия $\text{CO}_2$ с нефтью*

1. *Ограниченная эффективность на промысловых масштабах:* при использовании смешивающегося взаимодействия на промысловых масштабах углекислый газ может проявлять недостаточную эффективность из-за высокой подвижности газа и его быстрого распределения в пласте, что снижает воздействие на нефтяные молекулы [7].

2. *Зависимость от условий:* эффективность смешивания  $\text{CO}_2$  с нефтью может сильно зависеть от условий пласта, таких как давление, температура и состав нефти, что ограничивает универсальность этого метода [8].

3. *Неоднородные изменения свойств нефти:* растворение  $\text{CO}_2$  в нефти может вызывать неоднородные изменения в ее химическом составе, что затрудняет точное прогнозирование свойств и поведения нефти [9]. При растворении  $\text{CO}_2$  в нефти возникает опасность выпадения асфальтенов, что может привести к коагуляции порового пространства.

*Недостатки несмешивающегося взаимодействия CO<sub>2</sub> с нефтью.*

1. *Ограниченный контроль за процессом:* механизм несмешивающегося взаимодействия требует тщательного контроля, поскольку разделение фаз может привести к непредсказуемым изменениям в поровом пространстве, требуя более сложных инженерных решений [10].

2. *Зависимость от факторов пласта:* эффективность механизма вытеснения зависит от свойств породы, что делает его менее универсальным и требующим индивидуального подхода к каждому месторождению.

3. *Необходимость в комплексном моделировании:* для оптимизации несмешивающегося взаимодействия требуется использование сложных численных моделей, что может потребовать высоких затрат и времени [10].

### **Объект и методы исследования**

Объектом исследования является сложное взаимодействие углекислого газа (CO<sub>2</sub>) с нефтью, что является ключевым элементом оптимизации процессов нефтедобычи и углеродного управления.

Для получения всесторонних данных по смешивающемуся и несмешивающемуся взаимодействию были проведены лабораторные эксперименты. Исследования включали в себя инъекцию CO<sub>2</sub> в пластовую пробу нефти. Эксперименты предусматривали варьирование факторов, таких как давление, температура и концентрация, чтобы оценить их влияние на эффективность процессов взаимодействия.

Исследование также включало в себя анализ физических и химических свойств нефти, таких как вязкость и содержание асфальтенов. Это позволило более точно определить изменения в свойствах нефти, происходящие в процессе взаимодействия с CO<sub>2</sub>.

### **Экспериментальная часть**

В экспериментальной части исследования была проведена детальная постановка экспериментов. Были воспроизведены модельные условия пласта для образца нефти. Исследуемые пробы пластовой нефти подвергались эксперименту изотермического снижения давления (IDE-тест). Во время эксперимента проводилась визуальная и спектроскопическая оценка на предмет выпадения асфальтенов. Далее, проводилась инъекция CO<sub>2</sub> с последующим повторением IDE-теста. Инъекция CO<sub>2</sub> в эти модели позволила воссоздать реальные условия воздействия на нефтяные молекулы. Отслеживание изменений параметров, таких как давление, температура и состав нефти, осуществлялось в реальном времени для точной корреляции с результатами численного моделирования.

### **Результаты**

Как уже было упомянуто выше, при растворении CO<sub>2</sub> в нефти возникает опасность выпадения асфальтенов, что может привести к коагуляции порового пространства. Пример такого явления приведен на рисунках 1 и 2.



Масштаб — 778 × 571 мкм

**Рис. 1. Результаты визуального IDE-теста выпадения асфальтенов пластовой нефти исходной пробы при температуре 58,0 °С и давлении 35,951 МПа**

В ходе эксперимента были получены одинаковые снимки, которые свидетельствуют об отсутствии признаков выпадения асфальтенов в исходной пробе нефти (см. рис. 1).



а)



б)



в)

Масштаб — 779 × 572 мкм

**Рис. 2. Результаты визуального IDE-теста выпадения асфальтенов с концентрацией углекислоты 39,920 % моль при температуре 58,0 °С:**

а) Снимок № 1.  $P = 54,007$  МПа. Начало теста

б) Снимок № 96.  $P = 36,049$  МПа. Активный рост и флокуляция частиц

в) Снимок № 131.  $P = 28,997$  МПа. Конец теста

Как видно из результатов теста, при высоких концентрациях  $\text{CO}_2$  на изначальном давлении видны признаки наличия частиц (см. рис. 2). В дальнейшем с уменьшением давления происходит рост и флокуляция частиц асфальтенов.

### **Обсуждение**

В практической реальности выбор между смешивающимся и несмешивающимся взаимодействием зависит от специфических условий конкретного месторождения и целей оператора. Часто для достижения наилучших результатов применяют комбинацию обоих процессов, начиная со смешивающегося взаимодействия для снижения вязкости нефти и увеличения ее текучести, а затем переходя к несмешивающему взаимодействию для вытеснения нефти из порового пространства.

Инженеры и геологи проводят тщательные исследования месторождения, включая анализ физических и химических свойств нефти и пород, чтобы определить наилучший способ применения  $\text{CO}_2$  и достижения максимальной добычи нефти и углеродного управления.

Кроме того, учет экономических факторов, стоимости инфраструктуры и технической сложности играет важную роль в принятии решения о выборе метода взаимодействия  $\text{CO}_2$  с нефтью.

### **Выводы**

Взаимодействие  $\text{CO}_2$  с нефтью является сложным процессом, который включает в себя как смешивающиеся, так и несмешивающиеся механизмы. Исследования в этой области играют важную роль в оптимизации процессов добычи нефти и углеродного управления. Понимание этих механизмов помогает улучшить эффективность нефтедобычи и снизить воздействие на окружающую среду.

Взаимодействие углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) с нефтью представляет собой важный аспект нефтедобычи и стратегий углеродного управления. Два основных механизма этого взаимодействия, смешивающееся и несмешивающееся, обладают различными характеристиками и находят свое практическое применение в зависимости от конкретных условий и целей.

*Смешивающееся взаимодействие  $\text{CO}_2$  с нефтью* наиболее эффективно в следующих условиях.

1. **Вязкая нефть:** в месторождениях с высокой вязкой нефтью, такими как тяжелые нефти, смешивание  $\text{CO}_2$  с нефтью может существенно улучшить текучесть и способствовать увеличению добычи.
2. **Низкое давление:** при низких давлениях смешивание  $\text{CO}_2$  с нефтью может создать перепады давления, что помогает вытеснить нефть из порового пространства.
3. **Сложные пласты:** в месторождениях со сложной геологией или низкой проницаемостью пород смешивание  $\text{CO}_2$  может быть привлекательным для увеличения добычи.

4. Углеродное управление: смешивание CO<sub>2</sub> с нефтью может быть полезным в стратегиях захвата и хранения углерода (CCS).

*Несмешивающееся взаимодействие CO<sub>2</sub> с нефтью* предпочтительно в следующих условиях.

1. Средние и высокие давления: высокое давление способствует эффективному вытеснению нефти из порового пространства под действием CO<sub>2</sub>.

2. Пористые и проницаемые породы: в пластах с высокой проницаемостью и пористостью несмешивающееся взаимодействие может быть более эффективным.

3. Углеродное управление: этот метод также может использоваться для углеродного управления, особенно в контексте подземного хранения углерода (CCS).

4. Разнообразие типов нефтей: несмешивающееся взаимодействие можно успешно применять к различным типам нефтей без изменения их химического состава.

В реальности часто используются комбинированные подходы, начиная со смешивающегося взаимодействия для улучшения текучести нефти, а затем переходя к несмешивающемуся взаимодействию для вытеснения нефти. Решение о выборе метода зависит от геологических, технических, экономических и экологических факторов, а также от конкретных целей добычи и углеродного управления. Систематические исследования и моделирование помогают определить наилучший способ использования CO<sub>2</sub> для увеличения эффективности нефтедобычи и снижения выбросов углерода, что становится все более важным в современной нефтяной индустрии.

#### **Список источников**

1. Modeling of CO<sub>2</sub> solubility in crude oil during carbon dioxide enhanced oil recovery using gene expression programming / A. Rostami, M. Arabloo, A. Kamari, A. H. Mohammadi. – DOI 10.1016/j.fuel.2017.08.110. – Direct text // Fuel. – 2017. – Vol. 210. – P. 768–782.

2. Study on Enhanced Oil Recovery Mechanism of CO<sub>2</sub> Miscible Flooding in Heterogeneous Reservoirs under Different Injection Methods / X. Chen, H. Yu, A. Cao [et al.]. – DOI 10.1021/acsomega.3c03352. – Direct text // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8, Issue 27. – P. 24663–24672.

3. Numerical simulation study of CO<sub>2</sub> immiscible flooding in ultra-low permeability reservoir / J. Chi, X. Zhang. – Text : electronic // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 23. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101612>.

4. Experimental investigation of CO<sub>2</sub> injection side effects on reservoir properties in ultra tight formations / N. Badrouchi, H. Pu, S. Smith [et al.] – Text : electronic // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215, Part A. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110605>.

5. Modified Screening Criteria of Potential Asphaltene Precipitation in Oil Reservoirs / Y. H. Shokrlu, R. Kharrat, M. H. Ghazanfari, S. Saraji. – DOI 10.1080/10916460903567582. – Direct text // Petroleum Science and Technology. – 2011. – Vol. 29, Issue 13. – P. 1407–1418.

6. Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> and improving oil recovery for CO<sub>2</sub> assisted SAGD in super-heavy-oil reservoirs / C. Wang, P. Liu, F. Wang [et al.]. – DOI 10.1016/j.petrol.2018.02.058. – Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 165. – P. 1073–1080.
7. Ибрагимов, Г. З. Применение химических реагентов для интенсификации добычи нефти : справочник / Г. З. Ибрагимов, К. С. Фазлутдинов, Н. И. Хисамутдинов. – Москва : Недра, 1991. – 384 с. – Текст : непосредственный.
8. Трухина, О. С. Опыт применения углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов / О. С. Трухина, И. А. Синцов. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 3. – С. 205–209.
9. Лобанов, А. А. Исследование фазового поведения парафинов в пластовых углеводородных флюидах / А. А. Лобанов, Е. Ю. Пустова, А. Б. Золотухин. – DOI 10.17238/issn2227-6572.2016.4.75. – Текст : непосредственный // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия : Естественные науки. – 2016. – № 4. – С. 75–83.
10. Screening of Crude Oils for Asphalt Precipitation : Theory, Practice, and the Selection of Inhibitors / R. B. de Boer, K. Leerlooyer, M. R. P. Eigner, A. R. D. Van Bergen. – DOI 10.2118/24987-PA. – Direct text // SPE Production & Facilities. – 1995. – P. 55–61.

### **References**

1. Rostami, A., Arabloo, M., Kamari, A., & Mohammadi, A. H. (2017). Modeling of CO<sub>2</sub> solubility in crude oil during carbon dioxide enhanced oil recovery using gene expression programming. *Fuel*, 210, pp. 768-782. (In English). DOI: 10.1016/j.fuel.2017.08.110
2. Chen, X., Yu, H., Cao, A., Yang, Z., Li, W., Niu, Z.,... Du, M. (2023). Study on Enhanced Oil Recovery Mechanism of CO<sub>2</sub> Miscible Flooding in Heterogeneous Reservoirs under Different Injection Methods. *ACS Omega*, 8(27), pp. 24663-24672. (In English). DOI: 10.1021/acsomega.3c03352
3. Chi, J., & Zhang, X. (2021). Numerical simulation study of CO<sub>2</sub> immiscible flooding in ultra-low permeability reservoir. *Environmental Technology & Innovation*, 23. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101612>
4. Badrouchi, N., Pu, H., Smith, S., Yu, Y., & Badrouchi, F. (2022). Experimental investigation of CO<sub>2</sub> injection side effects on reservoir properties in ultra tight formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, Part A. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110605>
5. Shokrlu, Y. H., Kharrat, R., Ghazanfari, M. H., & Saraji, S. (2011). Modified Screening Criteria of Potential Asphaltene Precipitation in Oil Reservoirs. *Petroleum Science and Technology*, 29(13), pp. 1407-1418. (In English). DOI: 10.1080/10916460903567582
6. Wang, C., Liu, P., Wang, F., Atadurdyev, B., & Ovluyagulyev, M. (2018). Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> and improving oil recovery for CO<sub>2</sub> assisted SAGD in super-heavy-oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, pp. 1073-1080. (In English). DOI: 10.1016/j.petrol.2018.02.058
7. Ibragimov, G. Z., Fazludinov, K. S., & Khisamutdinov, N. I. (1991). *Применение химических реагентов для интенсификации добычи нефти: справочник*. Moscow, Nedra Publ., 384 p. (In Russian).

8. Trukhina, O. S., & Sintsov, I. A. (2016). Experience of carbone dioxide usage for enhanced oil recovery. *Advances in current natural sciences*, (3), pp. 205-209. (In Russian).
9. Lobanov, A. A., Pustova, E. Yu., & Zolotukhin, A. B. (2016). Wax Phase Behavior in Reservoir Hydrocarbon Fluids. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Science"*, (4), pp. 75-83. (In Russian). DOI: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.75
10. De Boer, R. B., Leerlooyer, K., Eigner, M. R. P., & Van Bergen, A. R. D. (1995). Screening of Crude Oils for Asphalt Precipitation : Theory, Practice, and the Selection of Inhibitors. *SPE Production & Facilities*, pp. 55-61. (In English).

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Хакимов Алишер Гафуржон** угли, аспирант, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, г. Архангельск, a.g.khakimov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1504-1855>

**Еремин Николай Александрович**, доктор технических наук, научный руководитель кафедры бурения скважин и разработки нефтяных и газовых месторождений, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, г. Архангельск; профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, г. Москва; ведущий Аналитическим центром энергетической политики и безопасности, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2401-1586>

**Alisher G. Khakimov**, Postgraduate, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, a.g.khakimov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1504-1855>

**Nikolai A. Eremin**, Doctor of Engineering, Scientific Director of the Department of Well Drilling and Oil and Gas Field Development, Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk; Professor at the Department of Oil Field Development and Operation, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow; Head of the Analytical Center for Energy Policy and Security, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS, Moscow, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2401-1586>

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.

The article was submitted 13.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.