

УДК 622.276.66

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАЗРЫВ ПЛАСТА  
СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА  
В УСЛОВИЯХ НИЗКОПРОНИЦАЕМОГО КОЛЛЕКТОРА**



**HYDRAULIC FRACTURING WITH SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE  
IN A LOW PERMEABILITY RESERVOIR**

**Галимов Денис Ильгизович**

студент,  
Санкт-Петербургский горный университет  
galimov15011@yandex.ru

**Савенок Ольга Вадимовна**

доктор технических наук,  
профессор кафедры разработки и эксплуатации  
нефтяных и газовых месторождений,  
Санкт-Петербургский горный университет  
Savenok\_OV@pers.spmi.ru

**Аннотация.** С каждым годом доля трудноизвлекаемых запасов углеводородов возрастает в общем количестве ресурсов за счёт истощения неосложнённых разрабатываемых запасов. Вследствие этого появляется необходимость в создании технологий, способствующих экономически и технологически целесообразной разработке нетрадиционных месторождений углеводородов. В статье рассматривается целесообразность замены традиционной жидкости гидравлического разрыва пласта (воды) на сверхкритический диоксид углерода с целью повышения эффективности мероприятия в условиях низкопроницаемого коллектора нефти и газа. Рассмотрены положительные и отрицательные стороны использования сверхкритического состояния углекислого газа и сравнение с водоструйным методом гидроразрыва пласта.

**Ключевые слова:** низкопроницаемые коллектора нефти и газа; разработка сланцевых залежей углеводородов; гидравлический разрыв пласта; водоструйная технология разрыва пласта; сверхкритическое состояние диоксида углерода; диаграмма фазового состояния углекислого газа; гидравлический разрыв пласта сверхкритическим диоксидом углерода.

**Galimov Denis Ilgizovich**

Student,  
Saint Petersburg mining university  
galimov15011@yandex.ru

**Savenok Olga Vadimovna**

Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the department  
of development and operation  
of oil and gas fields,  
Saint Petersburg mining university  
Savenok\_OV@pers.spmi.ru

**Annotation.** Every year the share of hard-to-recover hydrocarbon reserves increases in the total amount of resources due to the depletion of uncomplicated developed reserves. As a result, there is a need to create technologies that contribute to the economically and technologically feasible development of unconventional hydrocarbon deposits. The article discusses the feasibility of replacing the traditional hydraulic fracturing fluid (water) with supercritical carbon dioxide in order to increase the effectiveness of the measure in a low-permeability oil and gas reservoir. The positive and negative aspects of using the supercritical state of carbon dioxide and comparison with the water jet method of hydraulic fracturing are considered.

**Keywords:** low-permeability oil and gas reservoirs; development of shale hydrocarbon deposits; hydraulic fracturing; water jet fracturing technology; supercritical state of carbon dioxide; phase diagram of carbon dioxide; hydraulic fracturing with supercritical carbon dioxide.

**В**ведение

В настоящее время в пределах Российской Федерации и всего мира возрастает доля трудноизвлекаемых и нетрадиционных углеводородов в общем объёме запасов за счёт истощения разрабатываемых высокопродуктивных месторождений. Вследствие этого с целью восполнения ресурсов углеводородного сырья приоритет смещается от поиска новых неосложнённых разрабатываемых запасов к обеспечению рентабельности добычи «трудноизвлекаемых».

Трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ) – запасы залежей или частей залежи, отличающиеся сравнительно неблагоприятными для извлечения геологическими условиями залегания нефти и (или) физическими её свойствами, разработка которых существующими технологиями в условиях действующей налоговой системы экономически неэффективна [12].

Несмотря на экологический фактор, нефть сегодня является стратегическим источником сырья для нефтехимической промышленности. Движимая растущим спросом,

нефтяная промышленность проложила себе путь в нетрадиционные месторождения битума, тяжёлой и сланцевой нефти, которые изменили структуру нефтегазовой промышленности за последнее десятилетие.

С увеличением доли трудноизвлекаемых запасов в общем объёме углеводородных ресурсов появляется потребность в новых технических и технологических решениях, развитие которых должно быть постепенным и своевременным. Для обеспечения энергетической стратегии Российской Федерации по добыче углеводородов необходимо разрабатывать нетрадиционные запасы. В противном случае удерживать стабильный уровень добычи только за счёт неосложнённых разрабатываемых запасов в перспективе нескольких десятилетий не представляется возможным. Следовательно, правительство Российской Федерации заинтересовано в развитии отечественных технологий добычи трудноизвлекаемых запасов путём введения льготного налогообложения.

Импульсом развития разработки сланцевых углеводородных месторождений стало применение многостадийного гидравлического разрыва пласта в горизонтальных скважинах, что позволяет создать множество искусственных трещин, вследствие чего значительно улучшаются фильтрационные свойства пласта, что положительно сказывается на дебитах скважин.

Цель исследования состоит в том, чтобы рассмотреть целесообразность применения сверхкритического диоксида углерода в качестве жидкости гидравлического разрыва пласта вместо традиционного агента (воды), а также оценить возможность использования метода в условиях низкопроницаемой залежи.

### **Гидравлический разрыв пласта**

Благодаря развитию технологий горизонтального бурения и гидравлического разрыва пласта появилась возможность рентабельно разрабатывать ресурсы сланцевых месторождений.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) осуществляется при помощи агента нагнетания, способствующего разрушению горной породы и образованию трещин. Для разрушения породы агент необходимо закачивать с такой скоростью, которой будет достаточно для создания давления разрыва, превышающего значения прочности горной породы.

Стоит отметить, что многостадийный гидравлический разрыв пласта в горизонтальных скважинах используется не только для улучшения фильтрационных свойств пород, но и для формирования их в геологических телах, изначально непроницаемых для флюидов в исходном состоянии.

Сложность разработки сланцевых залежей углеводородов вызвана низкими значениями пористости и проницаемости. В ходе исследовательской работы «Экспериментальное исследование ступенчатого гидроразрыва пласта на естественно трещиноватых сланцевых обнажениях» Ван Ч. и др. пришли к выводу, что свойства естественных трещин (размер и ориентация) имеют большее влияние на направление распространения искусственных трещин после гидравлического разрыва пласта по сравнению с такими параметрами, как вязкость и степень проникновения жидкости ГРП. Следовательно, при выборе профиля скважины необходимо учитывать ориентацию естественных трещин в исследуемой горной породе [7].

Жидкость для гидравлического разрыва обычно представляет собой воду, содержащую проппант (преимущественно песок) для удержания созданных трещин в открытом виде, а также ряд химических добавок, которые изменяют свойства жидкости. Скважины часто оставляют на некоторый период времени (обычно от дней до недель) после проведения гидравлического разрыва пласта, после чего начинается добыча углеводородов из скважины. Изначально в продукции скважины преобладает жидкость – проппант, затем начинается добыча флюидов. Однако дебит углеводородов в скважинах, пробуренных на низкопроницаемые коллекторы, уменьшается намного быстрее, чем на газовых и нефтяных скважинах традиционных залежей [8].

Характеристики трещин, вызванных гидравлическим разрывом пласта в микроскопическом масштабе, имеют решающее значение для понимания механизма улучшения показателя проницаемости низкопроницаемых коллекторов. Подробное исследование по этой тематике провели Цзяньмин Хэ, Сяо Ли и др. в 2019 году. В результате работы они пришли к следующим выводам [9]:

1) микротрещины, развивающиеся в направлении максимального напряжения, намного длиннее и имеют меньшее разветвление по сравнению с микротрещинами, созданными в направлении минимального напряжения;

2) микротрещины, распространяющиеся вдоль границ минералов и органических веществ, могут повысить проницаемость горной породы, связывая органические поры, минералы и органические вещества.

С первых дней применения гидравлического разрыва пласта использовалась водоструйная технология высокого давления. Однако в некоторой степени широко используемая гидроабразивная технология не может соответствовать требованиям низкой стоимости и высокой эффективности бурения. Основные недостатки использования воды в качестве жидкости для гидравлического разрыва пласта следующие [1, 5]:

1) вода приводит к набуханию глинистого материала в пласте, впитываясь в микроразрывы и сланцевую поровую систему. Вода при этом остаётся в трещинах или порах за счёт капиллярных сил, что сужает или даже блокирует пути движения флюида, тем самым снижая проницаемость сланца;

2) риск загрязнения подземных и поверхностных водных ресурсов химическими и синтетическими веществами, которые добавляются в жидкость ГРП для повышения эффективности его проведения;

3) создание однонаправленных трещин; водоструйный метод гидравлического разрыва пласта показывает меньшую результативность в условиях низкопроницаемой породы, чем в случае традиционного коллектора. Это объясняется однонаправленностью создаваемых трещин, что не обеспечивает достаточного сообщения естественных и искусственных трещин со стволом скважины;

4) необходимость создания высокого давления нагнетания для создания трещин, что вызвано свойствами воды.

Следовательно, широко используемая водоструйная технология разрыва пласта не обладает достаточной эффективностью применительно к низкопроницаемым породам. Повышения результативности многостадийного гидравлического разрыва пласта в данном случае можно достичь безводными технологиями путём замены классической жидкости разрыва. Перспективным аналогом является сверхкритический диоксид углерода.

### **Сверхкритическое состояние диоксида углерода $\text{ScCO}_2$**

Сверхкритическое состояние вещества подразумевает наличие у рассматриваемого вещества свойств как газа, так и жидкости. В сверхкритическом состоянии диоксид углерода обладает околожидкой плотностью при невысоких значениях вязкости и сжимаемости, близкой к сжимаемости газов. Таким образом, изменяя термобарические параметры возможно получить необходимые характеристики вещества, больше приближая их к свойствам жидкости или газа.

На рисунке 1 представлена диаграмма фазового состояния углекислого газа в зависимости давления от температуры.

Установлено, что критическая точка диоксида углерода имеет следующие параметры: давление 7,38 МПа и температура 31,1 °С. Следовательно, для перехода в сверхкритическое состояние углекислому газу необходимо иметь значения давления и температуры выше критических параметров.

Диоксид углерода является нетоксичным, негорючим и недорогим веществом, при этом  $\text{CO}_2$  – неполярная молекула с небольшой полярностью. Сверхкритический углекислый газ выступает в качестве гидрофобного растворителя с полярностью, сравнимой с полярностью *n*-гексана. Следовательно, сверхкритический диоксид углерода способен растворять неполярные или лёгкие молекулы, в то время как полярные или тяжёлые молекулы имеют низкую растворимость. Этим обусловлена высокая диффузионная способность  $\text{CO}_2$  с углеводородными веществами, в частности, природным газом, нефтью и конденсатом.

### **Гидравлический разрыв пласта сверхкритическим диоксидом углерода $\text{ScCO}_2$**

Эффективность применения сверхкритического диоксида углерода в целях разрыва пласта обусловлена его уникальными свойствами, такими как околожидкая плот-

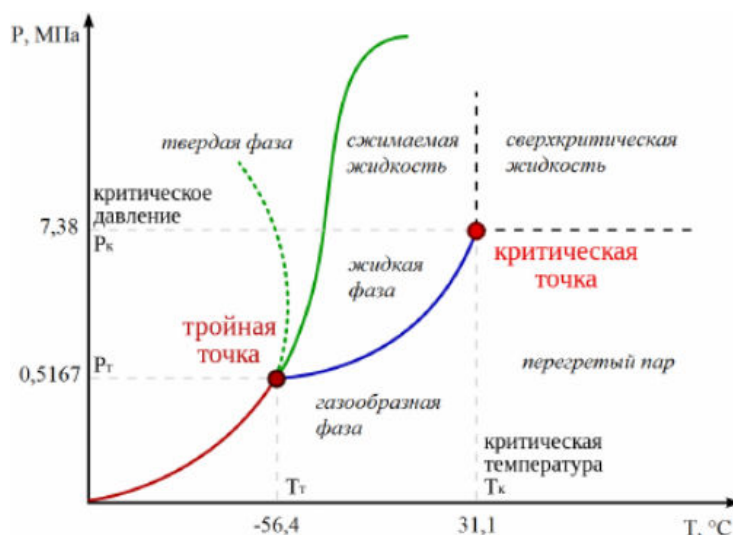
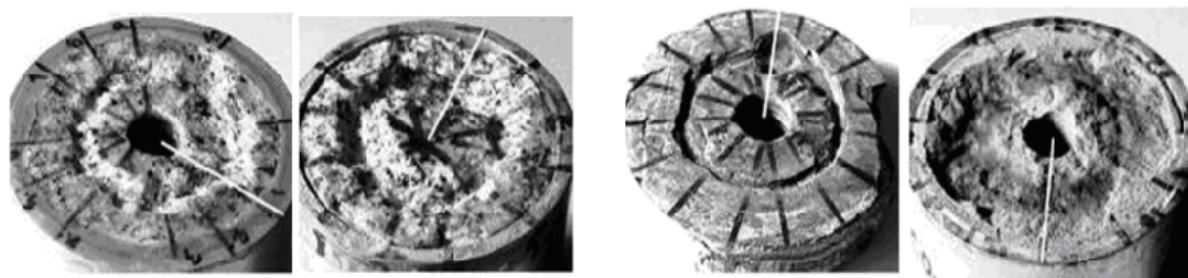


Рисунок 1 – Диаграмма фазового состояния  $\text{CO}_2$  [11]

ность, низкая вязкость и сильная диффузионная способность, что даёт данному методу экономические и экологические преимущества [2]. Стоит также отметить, что при использовании  $\text{ScCO}_2$  в качестве жидкости гидравлического разрыва пласта его сверхкритическое состояние в пластовых условиях не нарушается вследствие того, что критические значения давления и температуры диоксида углерода в большинстве случаев являются ниже пластовых.

Результаты лабораторных исследований показывают, что сверхкритический  $\text{CO}_2$  вызывает большую эрозию и позволяет значительно снизить давление нагнетания по сравнению с традиционной жидкостью разрыва пласта. Это объясняется влиянием рассматриваемого агента на характеристики сланцевой породы путём снижения его показателей прочности и упругости. При этом прочность уменьшается по мере увеличения времени воздействия. Так, использование сверхкритического диоксида углерода позволяет снизить давление разрыва на 50 % и в несколько раз увеличить объём разрушенной породы, чем в случае применения традиционной жидкости [3, 5].

Гидравлический разрыв пласта сверхкритическим диоксидом углерода позволяет получить множественные трещины неправильной формы, которые с большой вероятностью вызовут вторичные трещины в породе, соединяя при этом естественные с искусственными и образуя сложную сеть. Характер разрушения породы водоструйным методом и струёй сверхкритического диоксида углерода показан на рисунке 2 на примере белого гранита и сланца месторождения Манкос в США. Стоит также отметить, что применение сверхкритического  $\text{CO}_2$  показывает большую результативность в сланцевых коллекторах, чем в песчанике. Следовательно, использование данного агента для многостадийного гидравлического разрыва пласта в горизонтальных скважинах позволяет увеличить коэффициент извлечения углеводородов из низкопроницаемой породы [4].



вода (124 МПа)

$\text{ScCO}_2$  (124 МПа)

вода (193 МПа)

$\text{ScCO}_2$  (90 МПа)

белый гранит

сланец Манкос

Рисунок 2 – Сравнение эффективности разрушения горной породы струёй воды и при помощи сверхкритического углекислого газа [4]

По сравнению с водой сверхкритический углекислый газ не способствует набуханию глинистого материала в пласте. Кроме того, за счёт высокой диффузионной способности с углеводородными неполярными компонентами  $\text{ScCO}_2$  не вызывает защемление флюидов в пласте, а выходит на поверхность в смеси с полезными ископаемыми.

С увеличением эффективности разрыва пласта повышается риск причинения вреда экологии, в первую очередь, подземным водам. За счёт большой распространённости сети трещин флюиды, замкнутые в горной породе, получают доступ к подземным водам, что отрицательно сказывается на экологической обстановке района проведения работ. При этом риск загрязнения особенно повышается при незначительной мощности пласта. Так, для максимальной экологической безопасности перед проведением разрыва пласта сверхкритическим диоксидом углерода необходимо тщательно изучить положение водоносных пластов и убедиться в достаточной их удалённости от планируемой точки разрушения горной породы. Здесь важно отметить, что при утечке сверхкритического углекислого газа в окружающую среду будет наблюдаться его переход в газообразное состояние. При этом негативного воздействия на экологию данное явление не способно оказать, так как углекислый газ уже содержится в атмосферном воздухе в значительных количествах.

При невысокой степени извлечения углеводородов из низкопроницаемых залежей дополнительные затраты на получение, транспортировку, а также нагнетание углекислого газа в пласт нежелательны. В случае нетрадиционных запасов необходимо максимально снизить издержки добычи для рентабельной разработки залежи, что рассматриваемый метод обеспечить не способен.

Кроме того, для проверки данных и выводов, полученных в ходе проведения многочисленных лабораторных исследований, необходимо провести значительное количество полевых промысловых испытаний с применением многостадийного гидравлического разрыва пласта сверхкритическим диоксидом углерода в реальных условиях, каких на сегодняшний день недостаточно.

### **Заключение**

В ходе работы выявлены следующие проблемы, возникающие при разработке нетрадиционных месторождений: низкая степень извлечения углеводородов, высокие экономические затраты, загрязнение подземных вод в случае применения разрыва пласта.

Анализ целесообразности замены традиционной жидкости гидравлического разрыва пласта на сверхкритический диоксид углерода показал существенные преимущества рассматриваемого метода:

1) высокая диффузионная способность  $\text{ScCO}_2$  снижает значения прочности и упругости горной породы, что совместно с низкой вязкостью способствует уменьшению давления разрыва горной породы;

2) позволяет получить распространённую сеть трещин неправильной формы, соединяющих искусственные и естественные трещины пласта;

3) утечка в окружающую среду сверхкритического диоксида углерода не наносит вреда экологии;

4) не вызывает набухание глинистого материала в пласте и уменьшения проницаемости.

Наряду с преимуществами выявлены следующие недостатки применения сверхкритического углекислого газа:

1) слабая изученность метода в реальных условиях, эффективность использования  $\text{ScCO}_2$  обусловлена, главным образом, результатами лабораторных исследований;

2) дополнительные затраты, уменьшающие экономическую привлекательность проекта;

3) риск загрязнения подземных вод и нарушение экологической обстановки района проведения работ.

### **Литература**

1. Экспериментальное исследование давления разрушения сланца при предварительном кондиционировании жидким азотом перед азотным разрывом / Ю Ву [и др.] // Международный журнал горной науки и техники. – 2021. – Т. 31. – № 4. – С. 611–620. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.05.006>

2. Современные исследования по использованию сверхкритической технологии CO<sub>2</sub> при эксплуатации сланцевого газа / Ван Мэн [и др.] // Международный журнал горной науки и техники. – 2019. – Т. 29. – № 5. – С. 739–744. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.017>
3. Исследование физической структуры и химических свойств сланца, обработанного сверхкритическим CO<sub>2</sub> / Сян Ао [и др.] // Журнал утилизации CO<sub>2</sub>. – 2017. – № 20. – С. 274–281. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.028>
4. Экспериментальное исследование инициирования и распространения трещин в сланцах с использованием сверхкритического разрыва пласта углекислого газа / Синьвэй Чжан [и др.] // Топливо. – 2017. – Т. 190. – С. 370–378. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.120>
5. Гидравлический разрыв пласта сверхкритическим CO<sub>2</sub> для повышения извлечения сланцевого газа и связывания CO<sub>2</sub>: результаты, состояние и будущие проблемы / Цзюньпин Чжоу [и др.] // Достижения в области геознергетических исследований. – 2019. – № 3. – С. 207–224. – URL : <https://doi.org/10.26804/ager.2019.02.10>
6. Роль сверхкритического углекислого газа для рекуперации сланцевого газа и его связывания в сланцевых коллекторах / Цяо Лю [и др.] // Energy & Environmental Science. – 2021. – № 14. – С. 4203–4227. – URL : <https://doi.org/10.1039/d0ee03648j>
7. Ван Чэн, Янь Цзинь, Миан Чен. Экспериментальное исследование ступенчатого гидроразрыва пласта на естественно трещиноватых сланцевых обнажениях // Журнал геофизики и инженерии. – 2015. – Т. 12. – № 4. – С. 714–723. – URL : <https://doi.org/10.1088/1742-2132/12/4/714>
8. Райан Эдвардс, Майкл А. Селия. Сквжина для добычи сланцевого газа, данные о гидроразрыве пласта и пласте для поддержки моделирования потока газа и воды в сланцевых пластах // Исследования водных ресурсов. – 2018. – Т. 54. – № 4. – С. 3196–3206. – URL : <https://doi.org/10.1002/2017WR022130>
9. Распространение и характеристика микротрещин, вызванных гидроразрывом пласта в сланцах / Цзяньмин Хэ [и др.] // Энергия. – 2020. – № 191. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116449>
10. Рам Б. Гупта, Чжэ Джин Шим. Растворимость в сверхкритическом углекислом газе. – Бока-Ратон, 2006. – 960 с. – URL : <https://doi.org/10.1201/9781420005998>
11. Хромых Л.Н., Литвин А.Т., Никитин А.В. Применение углекислого газа в процессах повышения нефтеотдачи пластов // Вестник евразийской науки. – 2018. – № 5. – Т. 10. – URL : <https://esj.today/PDF/06NZVN518.pdf>
12. Шпуров И.В. Трудноизвлекаемые запасы Российской Федерации. Критерии и оценка. Возможность разработки // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2017. – № 7. – С. 8–12.
13. Савенок О.В., Арутюнов Т.В. Сланцевые углеводороды: анализ текущего состояния и перспективы разработки. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2019. – 272 с.
14. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Экологические проблемы при разработке месторождений сланцевых углеводородов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 9. – С. 39–42.
15. Галкин В.И., Колтырин А.Н. Исследование вероятностных моделей для прогнозирования эффективности технологии пропантного гидравлического разрыва пласта // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 650–659.
16. Техногенное воздействие на атмосферу при добыче и использовании углеводородов / Р.А. Ежиков [и др.] // REFERATOTECH: материалы II Международной научно-практической конференции (23 октября 2021 года, г. Краснодар): в 2 томах. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2022. – Т. 1. – С. 168–173.
17. Математическая модель линейного и нелинейного повышения концентрации пропанта при проведении ГРП – решение для последовательной закачки ряда типов пропанта / А.В. Кочетков [и др.] // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 210–216.
18. Кусова Л.Г. Нефтеотдача пласта и пути её увеличения // Вестник студенческой науки кафедры информационных систем и программирования. – 2018. – № 3 (6). – С. 97–120.
19. Кусова Л.Г. Анализ геологического строения баженовской свиты и критерии прогноза её нефтегазоносности // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 3. – С. 164–181.
20. Arutyunyan A.S., Petrushin E.O., Kusova L.G. Improvement of hydraulic facing technology by modeling permeability formed cracks for specific mining and geological conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Серия «International Science and Technology Conference «Earth Science», ISTC EarthScience (Virtual, On-line, 10-12 января 2022 года). Chapter 3. – 2022. – P. 042021.

## References

1. Experimental study of oil shale fracture pressure at preconditioning with liquid nitrogen before nitrogen fracturing / Yu Wu [et al.] // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2021. – V. 31. – № 4. – P. 611–620. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.05.006>
2. Current research on the use of supercritical CO<sub>2</sub> technology in shale gas exploitation / Wang Meng [et al.] // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – V. 29. – № 5. – P. 739–744. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.017>
3. Investigating the physical structure and chemical properties of shale treated with supercritical CO<sub>2</sub> / Xiang Ao [et al.] // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. – 2017. – № 20. – C. 274–281. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.05.028>
4. Experimental study of fracture initiation and propagation in shale using supercritical carbon dioxide fracturing / Xinwei Zhang [et al.]. – 2017. – V. 190. – P. 370–378. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.120>
5. Hydraulic fracturing with supercritical CO<sub>2</sub> to enhance shale gas recovery and CO<sub>2</sub> sequestration: results, status and future challenges / Junping Zhou [et al.]. – 2019. – № 3. – P. 207–224. – URL : <https://doi.org/10.26804/ager.2019.02.10>
6. The role of supercritical carbon dioxide for shale gas recovery and sequestration in shale reservoirs / Qiao Liu [et al.] // *Energy & Environmental Science*. – 2021. – № 14. – P. 4203–4227. – URL : <https://doi.org/10.1039/d0ee03648j>
7. Wang Cheng, Yan Jin, Mian Chen. Experimental study of staged hydraulic fracturing on naturally fractured shale outcrops // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2015. – V. 12. – № 4. – P. 714–723. – URL : <https://doi.org/10.1088/1742-2132/12/4/714>
8. Ryan Edwards, Michael A. Celia. Shale gas well, fracturing and reservoir data to support gas and water flow modeling in shale formations // *Water Resources Research*. – 2018. – V. 54. – № 4. – P. 3196–3206. – URL : <https://doi.org/10.1002/2017WR022130>
9. Propagation and characterization of microfractures caused by hydraulic fracturing in shales / Jianmin He [et al.]. – 2020. – № 191. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116449>
10. Ram B. Gupta, Jae Jin Shim. Solubility in supercritical carbon dioxide gas. – Boca Raton, 2006. – 960 p. – URL : <https://doi.org/10.1201/9781420005998>
11. Khromikh L.N., Litvin A.T., Nikitin A.V. Application of carbon dioxide in enhanced oil recovery processes // *Bulletin of Eurasian Science*. – 2018. – № 5. – V. 10. – URL : <https://esj.today/PDF/06NZVN518.pdf>
12. Shpurov I.V. Hard-to-recover reserves of the Russian Federation. Criteria and assessment. Possibility of development // *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*. – 2017. – № 7. – P. 8–12.
13. Savenok O.V., Arutyunov T.V. Shale hydrocarbons: analysis of the current state and prospects for development. – Krasnodar : Publishing House – Yug, 2019. – 272 p.
14. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Environmental problems in the development of shale hydrocarbon deposits // *Environmental protection in the oil and gas complex*. – 2015. – № 9. – P. 39–42.
15. Galkin V.I., Kolyrin A.N. Research of Probabilistic Models for Forecasting Efficiency of Proppant Hydraulic Fracturing Technology // *Zapiski Gornogo Institut*. – 2020. – V. 246. – P. 650–659.
16. Technogenic impact on the atmosphere during the extraction and use of hydrocarbons / R.A. Ezhikov [etc.] // *REFERATOTECH: Proceedings of the II International Scientific-Practical Conference (October 23, 2021, Krasnodar)* : in 2 volumes. – Krasnodar : Publishing House – Yug, 2022. – V. 1. – P. 168–173.
17. A mathematical model of linear and nonlinear increase in proppant concentration during hydraulic fracturing – a solution for sequential injection of several types of proppant / A.V. Kochetkov [etc.] // *Zapiski Gornogo institut*. – 2022. – V. 254. – P. 210–216.
18. Kusova L.G. Oil recovery and ways to increase it // *Bulletin of Student Science Department of Information Systems and Programming*. – 2018. – № 3 (6). – P. 97–120.
19. Kusova L.G. Analysis of the geological structure of the Bazhenov formation and criteria for prognosis of its oil and gas content // *Science. Technology. Tekhnologii (Polytechnicheskii Vestnik)*. – 2022. – № 3. – P. 164–181.
20. Arutyunyan A.S., Petrushin E.O., Kusova L.G. Improvement of hydraulic facing technology by modeling permeability formed cracks for specific mining and geological conditions // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference «Earth Science» Series, ISTC EarthScience (Virtual, On-line, 10-12 January, 2022)*. Chapter 3. – 2022. – P. 042021.