УДК 622.2

Лиинтин И.А.
Студент магистратуры
1 курс, Отделение нефти и газа
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск

МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

Аннотация: *В настоящее время энергопотребление в каждой точке планеты Земля неизменно растёт. Основными источниками топлива являются конечно же нефтепродукты, а также газ. Однако, при сжигании нефти, газа и нефтепродуктов в атмосферу выделяется огромное количество углекислого газа, что негативно влияет на экологическую обстановку во всем мире. Множественными исследованиями испытаниями установлено, что углекислый газ может применяться в качестве агента для повышения нефтеотдачи пластов, закачка* CO_2 *в пласт также решает проблемы его сбора и утилизации. В пример приведены некоторые свойства, такие как зависимость растворимости в воде от давления и температуры, как углекислого газа, так и его смеси с нефтью. В данной статье рассматриваются некоторые базовые способы использования углекислого газа с целью повышения нефтеотдачи пластов и особенности описанных методов. Также рассмотрены условия эффективного применения углекислого газа для повышения эффективности добычи нефти, в частности на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами, а именно высоковязкой нефтью. Отмечены отрицательные стороны использования*

углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов, а также проблемы, возникновение которых возможно в процессе разработки пластов указанными методами. Уделено внимание технологиям увеличения нефтеотдачи, основанным на использовании углекислого газа в сверхкритическом состоянии. Упомянуты современные технологии, позволяющие получать углекислый газ. Приведены примеры использования углекислого газа на месторождениях, а также результаты приведенных испытаний. Сделаны выводы о необходимости дальнейших исследований в направлении сверхкритического состояния веществ, в частности углекислого газа.

Ключевые слова: *высоковязкая нефть, добыча, сверхкритические флюиды, повышение нефтеотдачи пластов, углекислый газ, разработка месторождений, технологии.*

Abstract: *At present time energy usage at every point of planet Earth constantly growing. The main sources of fuel are of course oil products, as well as gas. However, during oil and gas combustion a huge amount of carbon dioxide is released into the atmosphere, which negatively affects the ecological situation throughout the world. Numerous studies and tests are estimated that carbon dioxide can be using as an agent for enhanced oil recovery, injection of* CO_2 *into the reservoir also solves problem of its collection and utilization. For example, some properties are given, such as the dependence of the solubility in water on the pressure and temperature, both of carbon dioxide and its mixture with oil. This article discusses some basic ways of using carbon dioxide for enhanced oil recovery and the specific features of the methods described. Also, the conditions for the effective use of carbon dioxide to improve the efficiency of oil production, in particular in fields with hard-to- recover reserves, namely hight-viscosity oil, are considered. Negative aspects of the use of carbon dioxide for increasing oil*

recovery of reservoirs, as well as problems that arise during the development of seams by these methods are noted. Attention is paid to enhanced oil recovery technologies based on the use of carbon dioxide in the supercritical state. Mentioned are modern technologies that make it possible to produce carbon dioxide. Examples of the use of carbon dioxide in deposits are given, as well as the results of the tests given. Conclusions are drawn about the need for further research in the direction of supercritical state of substances, in particular carbondioxide.

Keywords: *heavy oil, recovery (production), supercritical fluids, enhanced oil recovery, carbon dioxide, oil field development, technologies.*

Ввиду тенденции последних десятилетий, связанной со стремительным сокращением числа месторождений с легко извлекаемыми запасами, инженерам-нефтяникам приходится сталкиваться со все большим количеством трудностей при добыче нефти, решить которые с применением классических технологий по повышению нефтеотдачи пластов не представляется возможным [1, 2]. Для успешной разработки подобных месторождений необходимо применять более эффективные и в то же время сложные методы, способствующие сохранению уровня добычи. Одними из подобных методов являются газовые методы увеличения нефтеотдачи (МУН) [3, 4].

Одним из наименее затратных и простых в технологическом плане методов является закачка в пласт воздуха. При попадании воздуха в пласт, благодаря низкотемпературным окислительным процессам, воздух превращается в эффективный вытесняющий агент, в состав которого входит азот, углекислый газ, а также широкие фракции легких углеводородов. Данные окислительные процессы инициируются довольно быстро, а их интенсивность возрастает с увеличением температуры [5, 6, 7].

Одним из преимуществ метода закачки воздуха в пласт является использование воздуха в роли недорогого вытесняющего агента, а также

способность пластовой системы с увеличением пластовой температуры инициировать окислительные процессы [5, 6, 7]. Также в роли вытесняющего агента могут быть использованы углеводородные и сжиженные газы. При плотности нефти менее 800 кг/м^3, а также давлении нагнетания сухого углеводородного газа большем или равном 25 МПа, а для обогащенного газа давление составляет 15-20 МПа, происходит смешение газа с нефтью [8]. Для использования природный газ необходимо очистить и подготовить. Данные мероприятия проводятся на газовом промысле так же, как и для магистрального транспорта [3, 4].

В процессе добычи нефти встает вопрос о поддержании внутрипластового давления на заданном уровне. Соответственно, общий расход газа на нагнетание в пласт должен равняться сумме дебитов нефти, газа и воды, приведенных к пластовым условиям [9, 10]. Однако, резкое снижение эффективности процесса вытеснения и увеличение энергетических затрат может произойти ввиду преждевременного прорыва газа к добывающей скважине. Прорывы выявляются с помощью контроля над газовым фактором и химическим составом газа. С целью предупреждения прорывов газа в добывающие скважины необходимо уменьшить отбор жидкости из скважин, а также остановить скважины, в которых отмечается прорыв. Кроме того, возможно снизить объем нагнетаемого газа, продолжить закачку газа с жидкостью или проводить циклическую закачку газа [11].

Широко известен факт, говорящий о меньшей эффективности газа, как вытесняющего агента, в сравнении с водой. Это связано со свойством газа прорываться по высокопроницаемым зонам к добывающим скважинам по причине низкой, по сравнению с водой, вязкости газа [8, 12]. Данные недостатки связаны с особенностями фильтрации данных фаз: проникновение воды в мелкие поры и сужения в заводненной зоне гидрофильного пласта под действием капиллярных сил и проникновение газа, закачанного в пласт в виде несмачивающей фазы в загазованной зоне, в

крупные поры. Для достижения высоких показателей извлечения нефти рациональным решением являлось совмещение подобных особенностей газа и воды с возможностью циклического нагнетания их в пласт. Оптимальным соотношением объемов воды и газа при нагнетании в данном методе пропорционально отношению объемов мелких пор (ниже среднего размера) и крупных пор (выше среднего размера) в коллекторе. Эффективность вытеснения водогазовой смесью в данном случае обусловливается тем, что фазовая проницаемость воды, являющейся смачивающей фазой, зависит только от водонасыщенности, а наличие в пласте свободного газа увеличивает вытеснение нефти на величину предельной газонасыщенности (10-15 %), при которой газ неподвижен [8].

Одним из наиболее перспективных методов увеличения нефтеотдачи является использование CO_2 для водогазового заводнения. Углекислый газ (CO_2, диоксид углерода, двуокись углерода) – бесцветный газ, тяжелее воздуха. При нормальных условиях имеет плотность 1,98 кг/м³. Углекислый газ не токсичен, запаха не имеет [12]. Диоксид углерода обладает уникальным и крайне полезным для увеличения нефтеотдачи свойством, а именно способностью увеличивать вязкость воды при растворении в ней (при t = 20°C и p = 11,7 МПа вязкость карбонизированной воды составляет 1,21 мПа·с). Вязкость воды возрастает с увеличением в ней концентрации CO_2. При увеличении давления углекислый газ начинает активнее растворяться в воде (рис.1). Однако растворимость CO_2 уменьшается при повышении температуры до 80°C и минерализации воды [12, 13,14].

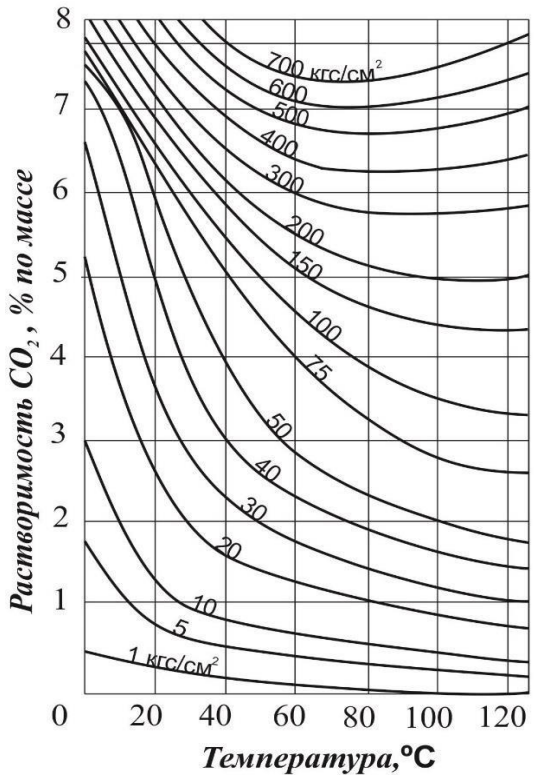

Рисунок 1. Зависимость растворимости углекислого газа в воде от давления и температуры (шифр кривых – давление насыщения воды двуокисью углерода) углеводородов (смол, парафинов и т. д.) [12]

В случае же с растворением CO_2 в нефти вязкость последней наоборот существенно уменьшается (рис.2). Следовательно, уменьшается поверхностное натяжение нефти на границе с водой. Вышеописанные свойства углекислого газа крайне важны при разработке месторождений с высоковязкой нефтью [8, 12, 13, 15].

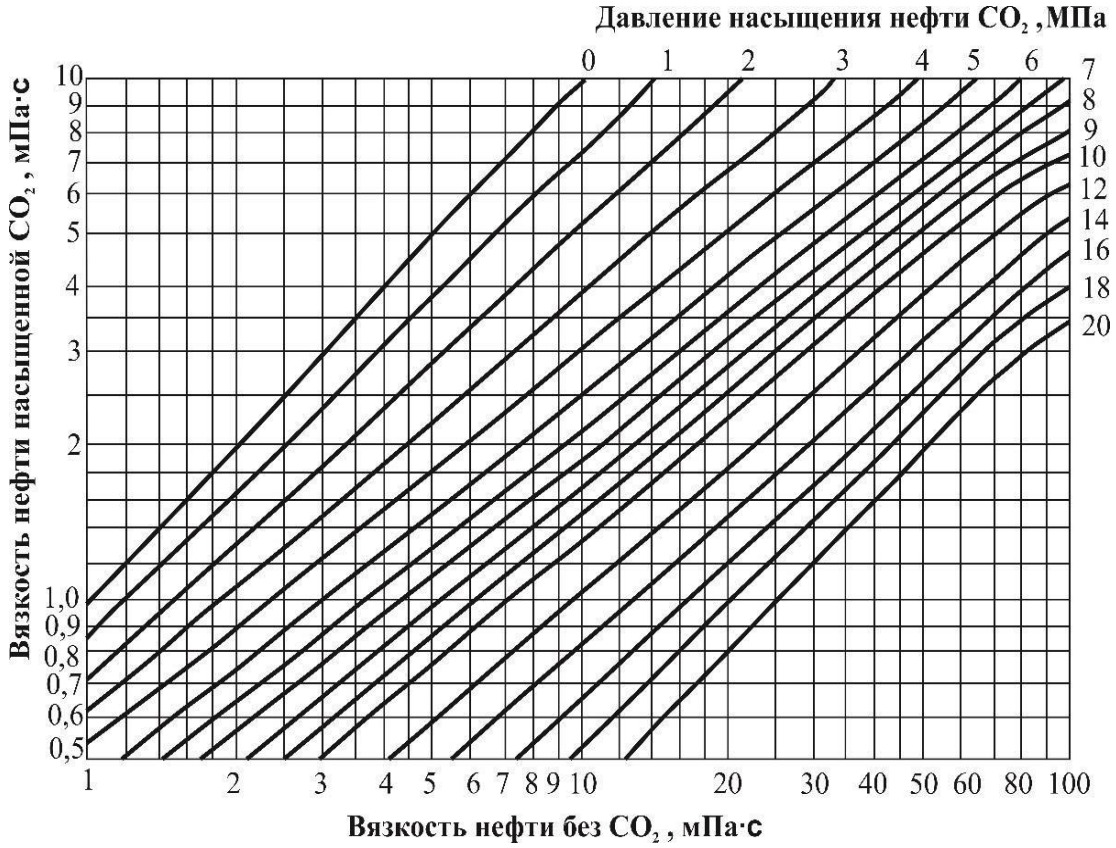

Рисунок 2. Зависимость вязкости нефтей от давления насыщения их двуокисью углерода [15]

В добавление к уже описанным свойствам нельзя не отметить свойство углекислого газа увеличивать объем нефти при растворении в ней, что позволяет существенно увеличить нефтеотдачу [8, 12,15].

Однако, несмотря на все положительные стороны применения углекислого газа для увеличения нефтеотдачи, данные технологии имеют свои ограничения, значительно понижающие возможность использования CO_2 как агента для газовых МУН.

Одним из самых серьезных недостатков является высокая коррозионная активность двуокиси углерода, что приводит к необходимости использовать особое коррозионностойкое оборудование для хранения, транспортировки и нагнетания в пласт диоксида углерода. Соответственно, себестоимость нефти, добытой с помощью данных методов, резко возрастает [16]. Также недостатком применения двуокиси углерода является его способность при неполном смешивании с нефтью экстрагировать из неё

легкие углеводороды. В результате чего нефть становится малоподвижной и, соответственно, возрастают затраты на её извлечение [16]. Существенной особенностью применения углекислого газа в процессах повышения нефтеотдачи может являться свойство CO_2 при насыщении парами воды образовывать кристаллогидраты [16].

Применение данного метода позволяет не только увеличивать нефтеотдачу сравнительно дешевым и простым в осуществлении методом, но и окажет значительное положительное влияние на концентрацию углекислого газа в атмосфере, так как данный МУН является также экономически выгодным способом по утилизации газа путем закачки его в нефтенасыщенные пласты.

Существует несколько способов использования углекислого газа при закачке его в пласт с целью увеличения нефтеотдачи.

1. закачка в пласт карбонизированной воды (вода, насыщенная углекислым газом);
2. закачка в пласт непосредственно CO_2 в газообразном или жидком состоянии;
3. закачка в пласт углекислого газа в сверхкритическом состоянии.

Закаченная в пласт вода, насыщенная двуокисью углерода, представляет из себя оторочку вытесняющего пластовые флюиды агента. Данный метод является более эффективным, по сравнению с методом заводнения пласта, благодаря способности углекислого газа увеличивать вязкость воды при растворении в ней [12].

Также известно, что использование карбонизированной воды как вытесняющего агента показывает меньшую эффективность, в сравнении с результатами при использовании комплексного воздействия на пласт диоксида углерода в газообразном или жидком состоянии затем карбонизированной воды в виде вытесняющего агента [15].

Данная особенность, возможно, связана с увеличением объема

нефтяной пленки, а также тяжелых компонентов на стенках пор под действием CO_2. В результате чего уменьшается их площадь контакта со стенками пор, трещин и каверн, что впоследствии позволяет эффективнее вымывать их из данных пустот при вытеснении пластовых флюидов карбонизированной или подтоварной водой [12, 15, 16].

Новейшим, а также одним из самых перспективных, и вместе с тем, малоизученных, методов увеличения нефтеотдачи, в особенности подходящих для месторождений высоковязкой нефти, с применением CO_2 является закачка в пласт углекислого газа в сверхкритическом состоянии. В данном состоянии диоксид углерода является эффективным, экологически чистым, и экономически выгодным растворителем. Стоит заметить, что растворяющая способность CO_2 в сверхкритическом состоянии возрастает с увеличением плотности при постоянной температуре, т. е. при увеличении давления [17].

Экологичность диоксида углерода в сверхкритическом состоянии обусловлена переходом газа из сверхкритического в газообразное состояние при его утечке в окружающую среду, в таком состоянии CO_2 не способен принести значительный вред окружающей среде, так как уже в ней присутствует и является неизменным спутником жизнедеятельности живых организмов.

В сверхкритическом состоянии флюида исчезают различия между жидкой и газовой фазой. Свойства флюида в таком случае представляют из себя промежуточный этап между свойствами жидкости и газа. Плотность такого вещества приближена к плотности жидкости, а сжимаемость близка к сжимаемости газов. Регулируя давление и температуру флюида представляется возможным управлять его свойствами, приближая их к свойствам жидкости или газа [18].

Так, на рисунке 3 представлена зависимость вязкости двуокиси углерода при различных значениях температуры и давления.

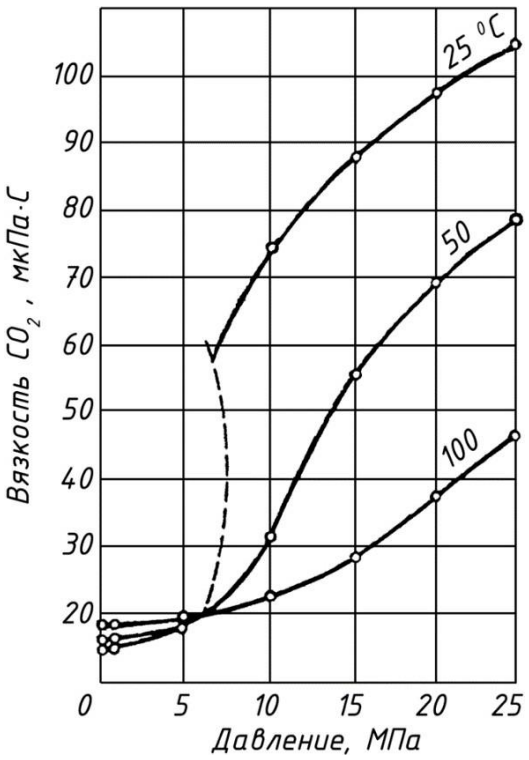

Рисунок 3. Зависимость вязкости CO_2 от давления при различных температурах [15]

Углекислый газ также имеет важное преимущество перед другими газами аналогами, CO_2 легче перевести в сверхкритическое состояние. Данный факт обуславливается низкими критическими показателями давления и температуры, по сравнению с остальными газовыми агентами. Так, для перехода диоксида углерода в сверхкритическое состояние необходимо обеспечить давление выше 7,38 МПа при температуре выше 31,1°С, что наглядно показано на фазовой диаграмме углекислого газа на рисунке 4 [12].

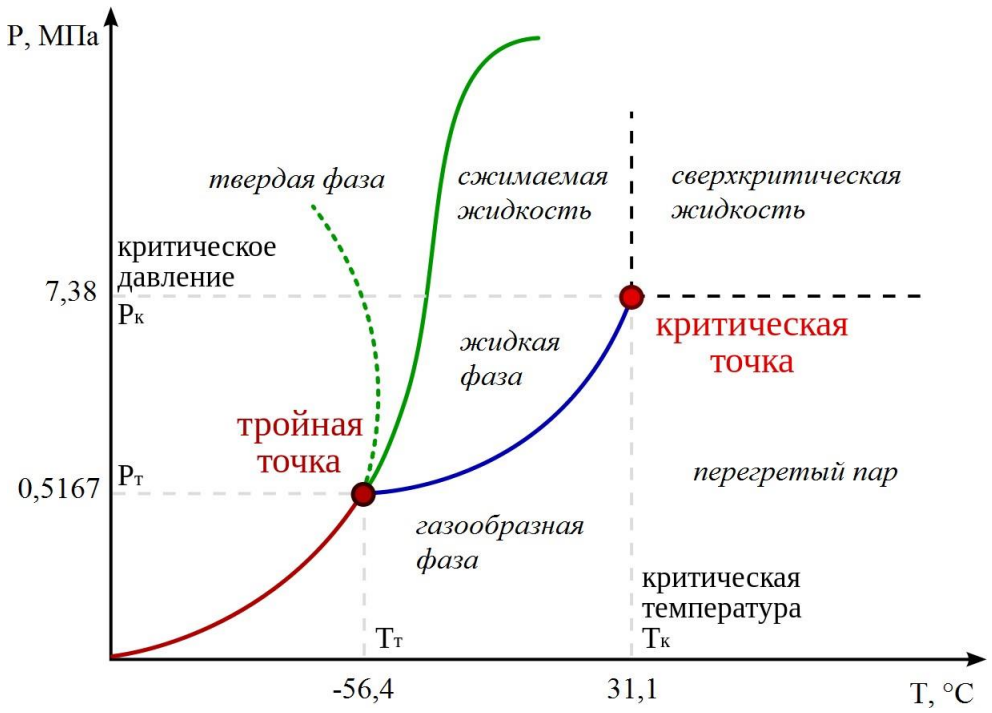

Рисунок 4. Диаграмма фазового перехода CO_2 [12]

Условия, удовлетворяющие нахождению углекислого газа в сверхкритичеком состоянии, представляется вполне возможным встретить в пластах на известных в данный момент нефтяных месторождениях. Это способствует использованию диоксида углерода в сверхкритическом состоянии для повышения нефтеотдачи пластов.

Современные технологии позволяют получать CO_2, с последующей транспортировкой по газовому трубопроводу, в цистернах посредством железной дороги или автомобильным транспортом, с помощью следующих методов:

- из отходов химического производства метанола, а также аммиака;
- из продуктов, образующихся при сжигании и попутных газов на нефтеперерабатывающих заводах;
- из отходов, образующихся в ходе работы ТЭЦ;
- из газов, побочных продуктов производства спирта, расщепления жиров.

Данные способы основаны на принципе утилизации отходов, что

способствует сокращению объема выбрасываемых в атмосферу вредных веществ, следовательно, и уменьшению вредного воздействия на окружающую среду.

На сегодняшний день применение CO_2 имеет перспективы в области увеличения нефтеотдачи, особенно для актуального в будущем и развивающегося на данный момент направления разработки месторождений с высоковязкой нефтью. Однако существующие недостатки технологий, связанные со свойствами углекислого газа, а также трудности в транспортировке накладывают серьезные ограничения, начиная от повышения стоимости проведения операции, заканчивая невозможностью использования подобных МУН на месторождениях.

Мировой опыт насчитывает множество проектов, основанных на использовании углекислого газа в роли нагнетаемого в пласт агента, как в США, Канаде, Венесуэле, так и в России.

Имеет смысл привести в пример результаты применения схожей технологии на месторождении высоковязкой нефти Bachaquero (Венесуэла), в результате которой на протяжении четырех месяцев достигалось увеличение показателей добычи по нефти. При использовании технологии нагнетания в пласт CO_2 удалось увеличить дебит до 71,5м^3 нефти в день против 16,2 м^3 при холодном способе добычи [19].

В США опыт применения CO_2 возможно отметить на месторождении Sacroc. По проектному документу прирост добычи оценивался в 7,5 %. До внедрения технологии добыча составляла 1869,7 м^3 нефти в день, однако после закачки CO2 – 4060,5 м^3 нефти в день [20].

Также не стоит забывать об отечественном опыте применения технологии закачки двуокиси углерода в пласт. Ярким примером является Радаевское месторождение, на котором закачка началась еще в 1984 году. Дополнительная добыча нефти составила 218 тыс. т, а удельный эффект от количества закачиваемого CO_2 – 0,28 т/т. Однако возникали сложности,

связанные с прорывами углекислотопровода, в результате которых эксплуатация стала невозможной и эксперимент был завершён [16].

На данный момент существует необходимость снижения коррозионного воздействия углекислого газа на наземное и подземное оборудование, в связи с чем, прежде всего, следует инициировать проведение лабораторных исследований как в области сверхкритических флюидов, так и в плане применения CO_2 в жидком, а также газообразном состояниях. Так, авторами данной статьи планируется создание специализированной PVT-ячейки с целью изучения воздействия сверхкритического углекислого газа на асфальте-носмолопарафиновые вещества, а также влияния на высоковязкие нефти в целом.

Библиографический список

1. Рощин П.В. Обоснование комплексной технологии обработки призабойной зоны пласта на залежах высоковязких нефтей с трещинно-поровыми коллекторами. диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.17 / минерально-сырьевой ун-т "Горный". Санкт-Петербург,2014.
2. Petukhov A.V., Kuklin A.I., Petukhov A.A., Vasques Cardenas L.C., Roschin P.V. Origins and integrated exploration of sweet spots in carbonate and shale oil-gas bearing reservoirs of the Timan-Pechora basin. В сборнике: Society of Petroleum Engineers – European Unconventional Resources Conference and Exhibition 2014: Unlocking European Potential 2014. С. 295-305.
3. Антониади Д.Г. Увеличение нефтеотдачи пластов газовыми и парогазовыми методами // Недра. –1998.
4. Кокорев В.И. Газовые методы – новая технология увеличения нефтеотдачи пластов // Нефтепромысловое дело. – Москва, 2009. – № 11. – С.24-26.
5. Васильевский А.В. и др. Комплексный подход к исследованию процессов закачки воздуха в пласт для повышения нефтеотдачи // Нефтяное

хозяйство. – 2016. – №. 11. – С.102-104.

6. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений: Учебное пособие для вузов. М., 1999. с.75.

7. Закиров С.Н. Теория и проектирование разработки газовых и газоконденсатных месторождений: Учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1989. с.215-220.

8. Покрепин Б.В. Разработка нефтяных и газовых месторождений. – Волгоград: Ин - Фолио, 2008.

9. Попов Е.Ю., Бондаренко Т.М., Добровольская С.А., Калмыков А.Г., Морозов Н.В., Ерофеев А.А. Потенциал применения третичных методов воздействия на нетрадиционные углеводородные системы на примере баженовской свиты. Нефтяное хозяйство. 2017. № 3. С.54-57.

10. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985 – 308 с.

11. Вафин Т.Р. Совершенствование технологий водогазового воздействия на пласт на нестационарном режиме: дис к.т.н. – Бугульма, 2016. – 144с.

12. Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. – Рипол Классик, 1982.

13. Газоциклическая закачка диоксида углерода в добывающие скважины для интенсификации добычи высоковязкой нефти / Волков В.А., Прохоров П.Э., Турапин А.Н., Афанасьев С.В. // Нефть. Газ. Новации. 2017. № 4. С.62-66.

14. Ольховская В.А. Подземная гидромеханика. Фильтрация неньютоновской нефти. учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130503 "Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений" направления подготовки специалистов 130500 "Нефтегазовое дело", по представлению Ученого совета ГОУ ВПО "Самарский государственный технический университет" / В.А.

Ольховская. Москва, 2011.

15. Проселков Е.Б., Проселков Ю.М. Физика пласта: учеб. пособие / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2011. – 188 с.

16. Трухина О.С., Синцов И.А. Опыт применения углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 3. – С. 205-209; URL: https://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35849 (дата обращения:07.11.2019).

17. Леменовский Д.А., Баграташвили В.Н. Сверхкритические среды. Новые химические реакции и технологии // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 10. – С.36-41.

18. http://eng.ege.edu.tr/~otles/SupercriticalFluidsScienceAndTechnology/Wc488d76f2c655.html.

19. Vega Riveros, G.L. & Barrios, H. (2011, January 1). Steam Injection Experiences in Heavy and Extra-Heavy Oil Fields, Venezuela. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/150283-MS.

20. Martin, D.F. & Taber, J.J. (1992, April 1). Carbon Dioxide Flooding. Society of Petroleum Engineers.doi:10.2118/23564-PA.