

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ВНУТРИПЛАСТОВОГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ ДОБЫЧИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ

**Балин И.В. Email: Balin660@scientifictext.ru**

*Балин Иван Владимирович – магистрант,  
кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений,  
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

**Аннотация:** вытеснение нефти методом внутрипластового горения – важный метод повышения нефтеотдачи, который интенсивно изучается в течение уже довольно большого временного периода. Этот метод считается особенно приемлемым для разработки пластов, содержащих «тяжелые» нефти. Несмотря на то, что уже существуют успешные проекты, требуются еще значительные исследования, прежде чем метод вытеснения нефти фронтом горения сможет широко применяться для разработки пластов трудноизвлекаемой нефти в промышленных масштабах. В данной работе рассматривается отечественный и зарубежный опыт по исследованию данной технологии, приводятся выводы.

**Ключевые слова:** разработка месторождений, баженовская свита, нефтеотдача, внутрипластовое горение, трудноизвлекаемые запасы нефти.

## POSSIBILITIES OF USE IN-SITU COMBUSTION METHOD TO EXTRACT HARD-TO-RECOVER OIL RESERVES

**Balin I.V.**

*Balin Ivan Vladimirovich – Master Student,  
DEPARTMENT OF DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS,  
TYUMEN INDUSTRIAL UNIVERSITY, TYUMEN*

**Abstract:** oil displacement by the method of in-situ combustion is an important method of enhanced oil recovery, which has been intensively studied for quite a long time period. This method is considered particularly suitable for the development of reservoirs containing "heavy" oil. In spite of the fact that successful projects already exist, considerable research is still needed before the method of displacing oil by the combustion front can be widely used to develop seams of hard-to-recover oil on an industrial scale. In this paper, domestic and foreign experiments on the study of this technology are considered, conclusions are given.

**Keywords:** development of fields, Bazhenov Formation, oil recovery, in-situ combustion, hard-to-recover oil reserves.

УДК 622.276.654

Проблема доизвлечения остаточной нефти из обводненных пластов, а так же проблема разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти (высоковязкие нефти, низкая проницаемость пласта-коллектора, керогеносодержащие коллектора и пр.) требует тщательного изучения.

Самостоятельный интерес представляет оценка добычных способностей продуктивных отложений баженовской свиты.

Использование кислорода для вытеснения нефти и применение воды и фронта горения - это два варианта метода, которые могут улучшить как техническую, так и экономическую эффективность технологии внутрипластового горения. Оба варианта имеют возможности снижения первоначальных затрат на закачку кислорода и повышение темпа отбора.

Вытеснение с закачкой кислорода предполагает закачку чистого кислорода или обогащенного кислородом воздуха вместо сжатого воздуха. Закачка кислорода могла бы быть дешевле закачки воздуха при высоких давлениях и скоростях потока. Было много рассуждений по поводу того, что эффективность вытеснения можно было бы улучшить за счет закачки кислорода. В литературе описаны многие возможные технические и экономические преимущества и возможные опасные последствия вытеснения нефти фронтом горения с использованием кислорода [2].

Вытеснение нефти водой и фронтом горения – это метод добычи, в котором вода закачивается одновременно с воздухом (или кислородом). Заводнение с горением может повысить эффективность метода вытеснения фронтом внутрипластового горения за счет уменьшения расхода закачиваемого воздуха, использованием тепла, остающегося позади фронта горения, и улучшения отбора нефти благодаря образованию более мощной зоны пара [7].

Эффективность вытеснения – это один из параметров вытеснения нефти внутрипластовым горением, который не исследовался достаточно широко и менее всего изучен.

Промышленный интерес для освоения в ближайшее время представляют битуминозные глинистые и кремнисто-глинистые отложения верхней юры и низов мела (баженовский горизонт и тетеревская свита), которые развиты на площади 1360 тыс. км<sup>2</sup> и имеют объем 37,00 тыс. км<sup>3</sup>. В целом, судя по имеющимся данным, отложения глинистых и глинисто-кремнистых пород Западной Сибири в любом случае представляют собой колоссальный стратегический резерв для поддержания уровня нефтедобычи в России на многие десятилетия [3].

Однако разработка таких отложений традиционными методами встретила со значительными трудностями. Хотя промышленная нефтеносность, например, пласта Ю<sub>0</sub> была установлена более, чем на 50 площадях, крупных открытий не последовало, несмотря на высокие начальные дебиты на отдельных скважинах. Бурение и опытно-промышленная эксплуатация были начаты ещё в 70-х годах. При этом обнаружилась значительная пространственная изменчивость продуктивности 86 скважин - 30% оказались «сухими», то есть не дали промышленного притока нефти. Выяснилась главная проблема эксплуатации подобных отложений вертикальными скважинами - быстрое падение дебита и невысокая накопленная добыча. Причины таких явлений связывают с низкой пористостью, проницаемостью и связностью коллектора.

Баженовскую свиту изучают уже 40 лет, опубликованы сотни статей, книг и диссертаций. Выдвигаются различные гипотезы о процессах её образования и преобразования, о свойствах пород, строении пластов, запасах и способах разработки. Большинство исследователей считает, что указанные отложения представляют собой совершенно уникальный объект, не похожий на традиционные по своим физическим свойствам и технологическим параметрам. Он требует особой методики подсчёта запасов и технологии разработки.

Но следует отметить, что, несмотря на 40-летнюю историю исследования и опытно-промышленной разработки месторождений баженовской свиты, окончательно технология их разработки, даже традиционными методами, пока окончательно не создана [5].

В России потенциальными объектами для применения метода внутрислоевого горения являются пермские, доманиковые отложения, а также баженовская свита.

Например, на базе НПК Петрофизических исследований ТО «СургутНИПИнефть» ОАО «Сургутнефтегаз» активно ведутся научно-исследовательские изыскания по разработке технологического процесса воздействия на битуминозно-глинистые отложения баженовской свиты методом внутрислоевого горения (ВГ). Работы носят экспериментальный характер и направлены на разработку методологических подходов по апробированию процесса ВГ в лабораторных условиях. Битуминозно-глинистые отложения баженовской свиты, как объект воздействия на них методом внутрислоевого горения занимают особое место в таких исследованиях. Поскольку, по предварительным оценкам специалистов ТО «СургутНИПИнефть» ОАО «Сургутнефтегаз», баженовская свита содержит огромные запасы углеводородов. По всем перспективным зонам отложений баженовской свиты на территории ОАО «Сургутнефтегаз» с геологическими запасами нефти, оцененными в 51,1 млрд тонн, ожидаемые извлекаемые запасы на естественном режиме – 164,2 млн. тонн, с применением ГРП во всех скважинах при плотности сетки 100 га - 659,8 млн тонн, а при термогидродействии – 5075,3 млн. тонн [6]. Поэтому проведение и анализ лабораторных исследований по методам разработки таких огромных запасов углеводородов является на сегодняшний день актуальной задачей.

Для проведения опытов по анализу окислительных процессов, происходящих в пористых средах при атмосферном давлении, была смонтирована лабораторная установка, в которой в качестве кернодержателя выступала реторта, помещенная в термощкаф с возможностью регулирования температуры. Основным недостатком такого подхода – проведение экспериментов в атмосферных условиях без учета горного и пластового давлений, а преимущество – относительно малое время проведения эксперимента и возможность отслеживания процессов окислительных реакций по температуре. Серия опытов по определению температуры инициирования проводилась как на дробленном керне, так и цельных образцах баженовской свиты при постоянном расходе воздуха, путем поэтапного нагревания породы в реторте с пошаговым интервалом температуры нагрева 25 °С. По увеличению температуры внутри реторты и снижению содержания кислорода в выходящем газе судили об образовании устойчивого фронта горения. Образцы перед опытом донасыщались нефтью под пластовым давлением. Дробленая порода разделялась на фракции и в зависимости от цели эксперимента также донасыщались нефтью. В качестве объекта исследования выступал керн, отобранный из пласта ЮС<sub>0</sub> Быстринского и Сахалинского месторождений с максимальным содержанием органического углерода.

В результате лабораторных экспериментов при различных условиях осуществления процесса ВГ были определены следующие параметры:

1. Коэффициент использования кислорода - отношение количества кислорода участвующего в реакции внутрислоевого горения, к общему его количеству, введенному в пласт с нагнетаемым воздухом. Величина этого коэффициента лежит в диапазоне от 31,9% до 73,4% для керна донасыщенного нефтью и в диапазоне от 19,1 до 55,9 для «сухой» породы. Каких – либо зависимостей от других

параметров процесса (удельная поверхность породы, расход закачиваемого воздуха, температура, и т.д.) выявить не удалось из-за недостаточного объема проведенных экспериментов.

2. Удельный массовый расход воздуха – массы воздуха, необходимой для выжигания 1 м<sup>3</sup> породы. Рассчитанный удельный расход воздуха на осуществление горения лежит в диапазоне от 2000 до 12000 кг/м<sup>3</sup> для зерна донасыщенного нефтью и в диапазоне от 3500 до 13000 для «сухой» породы.

Эти и другие параметры требуют детального анализа и уточнения, так как они определялись при атмосферном давлении.

В результате экспериментов по внутрислоевому горению пород баженовской свиты на насыпной модели и обобщения результатов изучения процессов окисления на ретортах, авторами были сделаны следующие выводы [6]:

1. Для пород баженовской свиты температура инициирования колеблется от 250 до 350 °С и зависит от удельной поверхности породы и расхода подаваемого в пласт воздуха. Чем выше удельная поверхность, тем выше температура инициирования.

2. При больших скоростях фильтрации (с увеличением расхода подаваемого воздуха в пласт) возможно повышение температуры инициирования из-за увеличения роли конвективного переноса тепла от инициатора горения вглубь пласта.

3. При высокой проницаемости пористой среды процесс вытеснения нефти за фронтом горения продуктами окислительных реакций происходит также и за счет ее теплового расширения.

4. Образующиеся тяжелые углеводороды на фронте горения и вытесняемые паром по длине модели оседают в так называемой «зоне коксования», что приводит к ухудшению фильтрационно-емкостных свойств породы и, как следствие, снижению скорости продвижения фронта горения.

5. В продуктах горения выявлено наличие сернистых соединений, что может приводить к образованию коррозионно-активных веществ – кислот, что в свою очередь, повышает износ оборудования.

6. В результате термохимического воздействия происходит изменение фильтрационно-емкостных свойств породы баженовской свиты.

Необходимо проведение дополнительных лабораторных исследований процессов ВГ для оценки влияния давления на процесс инициирования окислительных реакций.

Также, есть данные о проведении исследований и экспериментов, построении моделей ВГ сотрудниками организации «Gulf Research & Development Company».

Авторами исследований была разработана программа эксперимента для достижения понимания основного механизма процесса и изучения эффектов закачки кислорода в сравнении с воздухом и других параметров во время вытеснения нефти фронтом горения и вытеснения горением с заводнением в относительно маломощной залежи тяжелой нефти. Лабораторные исследования включали в себя опыты на трехмерной масштабированной модели и опыты с использованием трубы для воспроизведения процесса внутрислоевого горения. Основные опыты проводились на трехмерных физических моделях с использованием реальных пластовых нефтей и уровней давления. Условия проведения опыта были доведены до фактических пластовых условий.

Коллектор, или его прототип, воссоздаваемый трехмерной моделью, имел толщину продуктивного интервала 20 футов (6.1 м) и давление и температуру 3,4 МПа и 71°С, соответственно. Сырая нефть имела плотность 13°АНИ (0.98 г/см<sup>3</sup>) и вязкость 180 сантистокс (180 мм<sup>2</sup>/с) при пластовой температуре. Модель воспроизводит сетку размещения скважин 6 акров (24000 м<sup>2</sup>) или 2 акра (8000 м<sup>2</sup>) на скважину.

Для моделирования процесса вытеснения горением на трехмерных физических моделях было разработано экспериментальное оборудование. Оно включало в себя масштабированные модели и вспомогательное оборудование для набивки, создания объема и насыщения; систему для работы с флюидом для закачки, отбора, разделения продукта и анализа газа; системы регулирования температуры и контроля над возгоранием, регулирования потери тепла, и систему сбора данных для хранения, поиска и анализа данных. Автоматизированный сбор данных и системы управления флюидами использовались всякий раз, когда это было возможно.

Модель пласта состояла из песка, который содержался в тонкостенном ящике из нержавеющей стали. Коэффициент масштабирования для этой модели составлял 120. Следовательно, толщина модели 2 дюйма (51 мм) и расстояние между скважинами 32 дюйма (81 см) соответствуют прототипу месторождения мощностью 20 футов (6.1 м) и расстоянию между скважинами 320 футов (98 м). Лабораторное время в один час соответствовало 1,64 года для прототипа. Температура, давление и сырая нефть для модели были такими же, как и для прототипа.

Идентичные нагнетательные и добывающие скважины были размещены у противоположных углов модели. Нагнетательные и добывающие скважины были закончены выше середины толщины песка 29 щелевидными отверстиями. Гравийная набивка предотвращала проникновение пластового песка. Каждая скважина была обмотана изолированным электрическим нагревателем для зажигания и/или нагревания

ствола. Вблизи центра каждого ствола для забойных измерений были установлены отводы для измерения давления и термоколлорды.

В результате проведенных опытов, авторами исследования были сделаны следующие выводы:

1. Оба метода, вытеснение нефти горением с применением кислорода и с применением воздуха, являются эффективными методами для отбора нефти в относительно тонких песчаных пластах при малых размерах сетки размещения скважин.

2. Объемы пласта, подвергшиеся воздействию горением, до образования каналов внутрислового горения (или эффективность процесса вытеснения горением) были сопоставимы с результатами для случаев с закачкой кислорода и воздуха.

3. Закачка воды приводила к уменьшению эффективности вытеснения фронтом горения при использовании воздуха.

4. Объемы пласта, отмытые паром впереди фронта горения, повышались при сухом горении.

5. При влажном горении потребности в кислороде или воздухе были меньше, чем при сухом.

6. Прогнозируемые показатели нефтеотдачи и темпов отбора были выше, а прогнозируемые отношения кислород/нефть были ниже при влажном горении, чем при сухом для обоих случаев, с закачкой кислорода, и с закачкой воздуха.

7. Воздействие на пласт методом вытеснения нефти средней плотности горением приводило к более эффективному вытеснению, по сравнению с вытеснением более тяжелой нефти.

8. В рамках ограниченного диапазона условий этого исследования, более высокие давления и скорости закачки способствовали повышению эффективности вытеснения нефти фронтом горения.

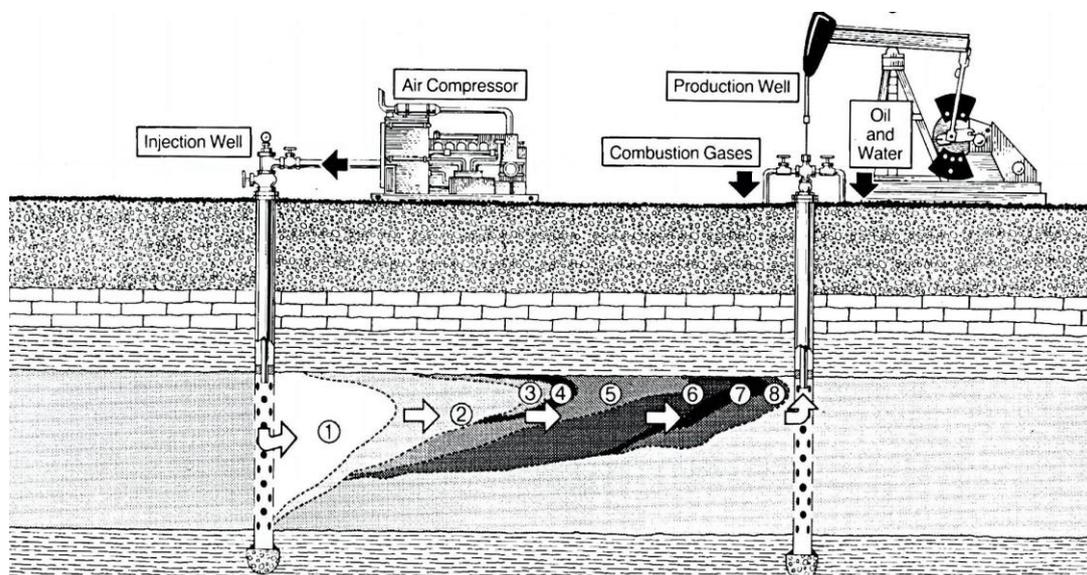


Рис. 1. Зоны внутрислового горения: 1 – закачка воздуха и воды; 2 – зона воздуха и испарившейся воды; 3 – фронт горения (зона горения (315-650°C); 4 – зона пара (200°C); 5 – зона конденсата или горячей воды (10-100°C); 6 – нефтяной вал

Значительным резервом поддержания (или увеличения) нефтедобычи могут являться совершенно нетрадиционные коллекторы: кремнисто-глинистые и карбонатно-кремнисто-глинистые битумонасыщенные породы, в первую очередь, баженовской свиты Западной Сибири.

Согласно некоторым оценкам, суммарные ресурсы нефти только в баженовской свите оцениваются в размере 0,8-2,1 трлн т., а потенциал прироста извлекаемых запасов нефти оценивается в размере 30-40 млрд т.

Одним из самых перспективных и универсальных методов для полномасштабной разработки таких месторождений является метод внутрислового горения, опыт исследования которого был представлен в данной работе.

#### Список литературы / References

1. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 332 с.
2. Бурже Жак. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов: [Пер. с фр.] / Ж. Бурже, П. Сурио, М. Комбарну; Под общ. ред. В.Ю. Филановского, Э.Э. Шпильрайна. М.: Недра, 1988. 421 с.
3. Брехунцов А.М., Нестеров И.И. Нефть битуминозно-глинистых и карбонатно-кремнисто-глинистых пород // Научно-практическая конференция им. Н.Н. Лисовского: «Инновационные технологии оценки, моделирования и разработки залежей нефти баженовской свиты». 28 сентября 2010 года.

4. Боксерман А.А., Желтов Ю.П. Внутрипластовое горение с заводнением при разработке нефтяных месторождений // Труды ВНИИнефть. Вып. 58. М: Наука, 1974.
5. Настольная книга по термическим методам добычи нефти / Д.Г. Антониади, А.Р. Гарушев, В.Г. Ишханов. Краснодар: «Советская Кубань», 2000. 464 с.
6. Вольф А.А. Особенности инициирования процесса внутрипластового горения в низкопроницаемых керогеносодержащих породах/ А.А. Вольф, А.А. Петров // Нефтяное хозяйство, 2006. № 4. С. 56-58.
7. Детерминированные и стохастические модели для контроля и регулирования гидросистем нефтяных промыслов [Текст]: монография: [в 2 томах] / С.И. Грачев, А.В. Стрекалов, А.Т. Хусаинов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Институт геологии и нефтегазодобычи. Тюмень: ТИУ, 2016. 21 см. Т. 1, 2016. 394 с.: ил., табл.; ISBN 978-5-9961-1319-4.