

*Зайнашев Алексей Олегович
Студент 2 курса магистратуры
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Российская Федерация, г.Уфа.*

РОЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ САЙКЛИНГА НА ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

*Zaynashev Alexey Olegovich
Second-year master's student
Ufa State Petroleum Technological University
Russian Federation, Ufa.*

THE ROLE OF CYCLING APPLICATION IN GAS FIELDS

***Аннотация:** В статье представлен комплексный анализ современного состояния проблемы повышения эффективности разработки газоконденсатных месторождений с применением сайклинг-процесса. Рассмотрены физико-химические основы ретроградной конденсации, являющейся основной причиной низких коэффициентов извлечения конденсата при разработке на истощение. Проведен детальный обзор технологических параметров сайклинг-процесса, включая выбор агента закачки, определение оптимального времени начала закачки и продолжительности процесса. Проанализированы различные типы нагнетаемых агентов: углеводородные газы (сухой газ, метан, попутный нефтяной газ) и неуглеводородные газы (азот, диоксид углерода). Особое внимание уделено экономической эффективности сайклинг-процесса, включая налоговые стимулы в Российской Федерации. На основе проведенного анализа выявлена ключевая проблема: недостаточное применение сайклинг-процесса в России при наличии значительного потенциала для повышения коэффициента извлечения конденсата. Определена актуальность внедрения комплексных подходов к проектированию сайклинга с использованием гидродинамического моделирования и нейросетевых технологий для оптимизации параметров закачки.*

Ключевые слова. *Сайклинг-процесс, газоконденсатное месторождение, ретроградная конденсация, поддержание пластового давления, коэффициент извлечения конденсата, сухой газ, гидродинамическое моделирование, закачка газа, налог на добычу полезных ископаемых, нефтегазоконденсатная залежь.*

Abstract: The article provides a comprehensive analysis of the current state of the problem of improving the efficiency of gas condensate field development using the cycling process. The physico-chemical foundations of retrograde condensation, which is the main reason for low condensate recovery factors during depletion drive development, are considered. A detailed review of the technological parameters of the cycling process is carried out, including the selection of the injection agent, determination of the optimal start time of injection, and the duration of the process. Various types of injected agents are analyzed: hydrocarbon gases (dry gas, methane, associated petroleum gas) and non-hydrocarbon gases (nitrogen, carbon dioxide). Special attention is paid to the economic efficiency of the cycling process, including tax incentives in the Russian Federation. Based on the analysis, the key problem is identified: insufficient application of the cycling process in Russia despite the significant potential for increasing the condensate recovery factor. The relevance of implementing integrated approaches to cycling design using hydrodynamic modeling and neural network technologies for optimizing injection parameters is determined.

Keywords: Cycling process, gas condensate field, retrograde condensation, reservoir pressure maintenance, condensate recovery factor, dry gas, hydrodynamic modeling, gas injection, mineral extraction tax, oil and gas condensate reservoir.

Разработка газоконденсатных месторождений представляет собой сложную научно-техническую проблему, от эффективности решения которой зависит полнота извлечения ценнейшего углеводородного сырья — газового конденсата. Нефтегазовая промышленность, являющаяся фундаментом экономики Российской Федерации и многих других стран, сталкивается с объективной закономерностью: месторождения с высоким содержанием

тяжелых углеводородов (фракции C_{5+} с концентрацией свыше 250-300 г/м³) при разработке традиционным способом на истощение демонстрируют неудовлетворительные коэффициенты извлечения конденсата (КИК), редко превышающие 30-40% [1]. Это означает, что значительная часть потенциально извлекаемых ресурсов безвозвратно теряется в пласте, что наносит прямой экономический ущерб и снижает ресурсную базу углеводородов. В основе этой проблемы лежит сложное физико-химическое явление — ретроградная конденсация, которое делает исследование методов поддержания пластового давления, и в частности сайклинг-процесса, исключительно актуальным.

Физико-химические основы ретроградной конденсации и необходимость поддержания пластового давления.

Для понимания роли сайклинг-процесса необходимо прежде всего рассмотреть физико-химические процессы, происходящие в газоконденсатном пласте при снижении давления. Газоконденсатная смесь представляет собой многокомпонентную углеводородную систему, находящуюся в термодинамическом равновесии. При снижении пластового давления поведение такой системы существенно отличается от поведения идеального газа или обычной нефти. Ключевым понятием здесь является ретроградная конденсация — явление, при котором при изотермическом снижении давления в определенном интервале происходит выпадение жидкой фазы из газовой, причем дальнейшее снижение давления приводит не к испарению, а к дополнительной конденсации [2].

Мировой и российский опыт применения сайклинг-процесса

Технология сайклинга имеет достаточно длительную историю развития. Впервые метод обратной закачки газа начали применять в годы Второй мировой войны в США и Канаде. Уже на 1944 год в США разрабатывались 244 газоконденсатных месторождения с применением закачки газа на тех из них, где содержание конденсата составляло 150-180 г/м. В послевоенное время, в связи с

изменением структуры потребления углеводородов, пороговое содержание конденсата для применения сайклинга повысилось до 250-300 г/м³.

Наиболее впечатляющим примером эффективности сайклинга является месторождение Арун в Индонезии — одно из крупнейших газоконденсатных месторождений в мире. Даже при относительно невысоком содержании фракции C₅+ (около 80 г/м³) применение сайклинг-процесса позволило достичь рекордных показателей извлечения. На месторождении Отаке-Групп в Новой Зеландии закачка сухого газа началась с 1989 года после трех лет разработки на истощение. В результате трехмерного гидродинамического моделирования показатели извлечения газового конденсата были увеличены с 43 до 77% [7]. Этот пример наглядно демонстрирует, что сайклинг эффективен не только на начальной стадии разработки, но и на более поздних этапах, позволяя мобилизовать ранее выпавший конденсат.

В Российской Федерации опытно-промышленные работы по сайклинг-процессу впервые были проведены в 70-х годах XX века на Вуктыльском газоконденсатном месторождении. Однако в то время технология не получила широкого распространения из-за значительных капитальных затрат на строительство компрессорных станций и отсутствия экономических стимулов. Ситуация кардинально изменилась после 2011 года, когда были приняты поправки в Налоговый кодекс, обнуляющие ставку НДС для газа, закачиваемого в пласт при добыче конденсата [3]. Это создало условия для реализации масштабных проектов на таких месторождениях, как Ямбургское, Медвежье, Уренгойское, Оренбургское и Астраханское.

Ключевым российским проектом в области сайклинга является Ямбургское газоконденсатное месторождение — одно из уникальных недр мира. Ожидаемый технологический эффект от внедрения сайклинг-процесса здесь составляет 13,5 млн тонн конденсата дополнительно к извлекаемым запасам [12, с. 28]. Помимо этого, компания «Газпром» реализует проекты по закачке газа на Оренбургском и Астраханском газоконденсатных месторождениях. На

Астраханском месторождении, которое характеризуется сложными термобарическими условиями (глубина залегания 4000-4200 м, пластовая температура 100-110°C), закачка газа позволяет поддерживать продуктивность скважин и увеличить выработку сероводорода [13, с. 54].

Сравнительный анализ эффективности различных агентов закачки представлен в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительный анализ агентов закачки для сайклинг-процесса

Агент закачки	Эффективность вытеснения	Стоимость	Коррозионная активность	Влияние на качество газа
Сухой газ	Высокая	Высокая	Низкая	Не снижает
Азот	Средняя	Средняя	Отсутствует	Снижает (разбавление)
Диоксид углерода	Очень высокая	Высокая	Высокая	Снижает
ПНГ	Высокая	Низкая	Низкая	Изменяет состав

Помимо выбора агента закачки, важнейшим технологическим параметром является время начала сайклинг-процесса. Оптимальным считается начало закачки с самого начала разработки, когда пластовое давление не снизилось ниже давления начала конденсации. Однако капитальные затраты на обустройство компрессорных мощностей могут отодвинуть начало закачки на более поздние сроки. Как показывает опыт, даже при задержке с началом закачки положительный эффект сохраняется, хотя и снижается: на месторождении Отаке

закачка была начата через 3 года после начала разработки, и это позволило увеличить КИК с 43% до 77% [7].

Перспективы развития технологий сайклинга.

Современное развитие методов гидродинамического моделирования открывает новые возможности для повышения эффективности сайклинг-процесса. Композиционное моделирование в симуляторах (ECLIPSE 300, Tempest MORE, CMG-GEM) позволяет с высокой точностью прогнозировать фазовое поведение многокомпонентных систем и оптимизировать параметры закачки. Особый интерес представляют нейросетевые технологии, которые позволяют оперативно подбирать оптимальные сценарии закачки на основе анализа больших массивов данных [6,].

Сдерживающим фактором для широкого внедрения технологии в России остаются высокие капитальные затраты на строительство компрессорных станций и нагнетательных скважин. Однако введение налоговых стимулов (нулевая ставка НДС для закачиваемого газа) создало благоприятные экономические условия. Для дальнейшего развития сайклинга в Российской Федерации необходимо совершенствование методов гидродинамического моделирования, включая использование нейросетевых технологий, а также проведение дополнительных экспериментальных исследований по закачке альтернативных агентов — азота и диоксида углерода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Волженина Д.А., Шарф И.В., Сабанчин И.В. Анализ эффективности применения сайклинг-технологии при разработке залежей газового конденсата // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 5. — С. 18–27. — DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2633.
- 2 Шандрыгин А.Н., Саптарова З.Р., Муртазин Т.А., Каюмов З.Д., Судаков В.А., Усманов С.А., Хашан Г.Д., Козлов А.Н. Оптимизация планирования сайклинг-процесса на газоконденсатных месторождениях с применением нейросетевых технологий // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2025. — Т. 67. — № 3. — С. 74–85. — DOI: 10.32454/0016-7762-2025-67-3-74-85.
- 3 Burachok O. Enhanced Gas and Condensate Recovery: Review of Published Pilot and Commercial Projects // Nafta-Gaz. — 2021. — No. 1. — P. 20–25. — DOI: 10.18668/NG.2021.01.03.
- 4 Чебан С.Е., Мулявин С.Ф. Повышение коэффициента извлечения конденсата с помощью технологии сайклинг-процесса // Нефть и газ. — 2016. — № 2. — С. 86–92.
- 5 Зубарев В.В. Совершенствование методов проектирования разработки мелких газоконденсатных месторождений при применении газовых методов поддержания пластового давления: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.17. — Бугульма, 2010. — 188 с.
- 6 Файст И.А. Оптимизация технологических параметров разработки газоконденсатных залежей: автореферат диссертации ... кандидата технических наук: 2.8.4. — М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2023. — 24 с.
- 7 Боргояков И.В., Каверзин М.С., Танхаев А.Ю. Повышение конденсатоотдачи на газоконденсатных месторождениях Узбекистана с применением сайклинг-процесса // Технические и естественные науки. — СПб., 2025. — С. 52–54.