

УДК 622.276.6; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-4.10>

<https://orcid.org/0000-0001-9278-7653>

<https://orcid.org/0000-0001-8025-0824>

<https://orcid.org/0000-0001-6665-4558>

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАЗАХСТАНА



Д.Е. БАЛГАЕВ*,
PhD, старший преподаватель,
d.balgayev@satbayev.university



С.А. ЗАУРБЕКОВ,
кандидат технических наук,
профессор,
s.zaurbekov@satbayev.university



Е.Е. САРЫБАЕВ,
PhD, старший преподаватель,
y.sarybayev@satbayev.university

SATBAYEV UNIVERSITY

Республика Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

В статье представлен расширенный аналитический обзор современных методов воздействия на высоковязкие нефтяные пласты, применяемых в условиях месторождений Казахстана. Рассмотрены основные технологии повышения нефтеотдачи, включая гидроразрыв пласта, кислотные обработки, тепловые, физические и химические методы, а также современные комбинированные подходы. Особое внимание уделено анализу механизмов воздействия, их эффективности и ограничений при разработке трудноизвлекаемых запасов.

Показано, что эффективность рассматриваемых методов определяется совокупностью геолого-физических характеристик пласта, таких как проницаемость, неоднородность, температура и давление, а также свойствами нефти, включая её вязкость и состав. Установлено, что традиционные методы, несмотря на широкое применение, имеют ряд существенных недостатков, связанных с высокой энергоёмкостью, значительными затратами и рисками ухудшения состояния призабойной зоны.

Особое внимание уделено комбинированным технологиям воздействия, в частности термобарохимическому воздействию, сочетающему тепловые, химические и газодинамические эффекты. Показано, что применение данных технологий в сочетании с системами непрерывной подачи реагентов обеспечивает более равномерное распределение активных веществ, стабилизацию процессов и повышение эффективности воздействия на пласт.

Сделан вывод о целесообразности перехода к интегрированным технологиям разработки, позволяющим повысить коэффициент нефтеотдачи, снизить энергозатраты и обеспечить устойчивое развитие нефтедобычи в Казахстане.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высоковязкая нефть, призабойная зона, методы воздействия, нефтеотдача, термобарохимическое воздействие, пневмотранспорт.

ҚАЗАҚСТАН КЕН ОРЫНДАРЫНДАҒЫ ЖОҒАРЫ ТҰТҚЫР МҰНАЙ ӨНДІРУДІ ҚАРҚЫНДАТУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

Д.Е. БАЛГАЕВ*, PhD, аға оқытушысы, d.balgayev@satbayev.university
С.А. ЗАУРБЕКОВ, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, s.zaurbekov@satbayev.university
Е.Е. САРЫБАЕВ, PhD, аға оқытушысы, y.sarybayev@satbayev.university

SATBAYEV UNIVERSITY

Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтбаев к., 22

Мақалада Қазақстан кен орындары жағдайында қолданылатын жоғары тұтқыр мұнай қабаттарына әсер етудің заманауи әдістеріне кеңейтілген аналитикалық шолу ұсынылған. Ұңғыманың мұнай бергіштігін арттырудың негізгі технологиялары қарастырылған, оның ішінде қабатты гидроажырату, қышқылмен өңдеу, жылулық, физикалық және химиялық әдістер, сондай-ақ заманауи кешенді тәсілдер. Әсер ету механизмдерін, олардың тиімділігі мен қиын алынатын қорларды игеру кезіндегі шектеулерін талдауға ерекше назар аударылған.

Қарастырылған әдістердің тиімділігі қабаттың геологиялық-физикалық сипаттамаларының жиынтығына, мысалы өткізгіштігі, әртектілігі, температурасы мен қысымы, сондай-ақ мұнайдың қасиеттеріне, оның ішінде тұтқырлығы мен құрамына тәуелді екені көрсетілген. Дәстүрлі әдістер кеңінен қолданылғанына қарамастан, олардың жоғары энергия сыйымдылығы, елеулі шығындар және ұңғыма маңы аймағының жағдайын нашарлату тәуекелдерімен байланысты бірқатар маңызды кемшіліктері бар екені анықталған.

Әсер етудің кешенді технологияларына, атап айтқанда жылулық, химиялық және газодинамикалық әсерлерді біріктіретін термобарохимиялық әсерге ерекше назар аударылған. Бұл технологияларды реагенттерді үздіксіз беру жүйелерімен бірге қолдану белсенді заттардың біркелкі таралуын қамтамасыз етіп, процестерді тұрақтандырып, қабатқа әсер ету тиімділігін арттыратыны көрсетілген.

Қазақстанда мұнай өндірудің тұрақты дамуын қамтамасыз ету, энергия шығындарын азайту және мұнай бергіштік коэффициентін арттыру үшін интеграцияланған игеру технологияларына көшу қажеттілігі туралы қорытынды жасалған.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: жоғары тұтқыр мұнай, ұңғыма маңы аймағы, әсер ету әдістері, мұнай бергіштік, термобарохимиялық әсер, пневмотасымалдау.

TECHNOLOGIES FOR ENHANCED RECOVERY OF HEAVY OIL IN KAZAKHSTAN FIELDS

D.Y. BALGAYEV*, PhD, senior lecturer, d.balgayev@satbayev.university
S.A. ZAURBEKOV, candidate of technical sciences, professor, s.zaurbekov@satbayev.university
Y.Y. SARYBAYEV, PhD, senior lecturer, y.sarybayev@satbayev.university

SATBAYEV UNIVERSITY

Republic of Kazakhstan, 050013, Almaty, Satpayev str., 22

The article presents an extended analytical review of modern methods for stimulating high-viscosity oil reservoirs applied under the conditions of Kazakhstan oil fields. The main enhanced oil recovery (EOR) technologies are considered, including hydraulic fracturing, acid treatments, thermal, physical, and chemical methods, as well as modern combined approaches. Particular attention is

paid to the analysis of the mechanisms of action, their efficiency, and limitations in the development of hard-to-recover reserves.

It is shown that the effectiveness of the considered methods is determined by a combination of geological and physical characteristics of the reservoir, such as permeability, heterogeneity, temperature, and pressure, as well as oil properties, including its viscosity and composition. It has been established that traditional methods, despite their widespread use, have a number of significant drawbacks associated with high energy intensity, considerable costs, and risks of deterioration of the near-wellbore zone.

Special attention is given to combined stimulation technologies, in particular thermobarochemical treatment, which integrates thermal, chemical, and gas-dynamic effects. It is demonstrated that the application of these technologies in combination with continuous reagent injection systems ensures a more uniform distribution of active substances, process stabilization, and increased efficiency of reservoir stimulation.

It is concluded that a transition to integrated development technologies is advisable to improve the oil recovery factor, reduce energy consumption, and ensure sustainable development of oil production in Kazakhstan.

KEYWORDS: high-viscosity oil, near-wellbore zone, stimulation methods, oil recovery, thermobarochemical treatment, pneumatic transport.

Введение. Разработка месторождений высоковязкой нефти является одной из наиболее сложных задач современной нефтегазовой отрасли Казахстана. Значительная часть запасов углеводородов страны относится к категории трудноизвлекаемых, что обусловлено высокой вязкостью нефти, низкой проницаемостью коллекторов и сложными геолого-физическими условиями залегания пластов [1–3].

Высоковязкие нефти характеризуются выраженными реологическими особенностями, включая нелинейную зависимость вязкости от температуры и давления, а также повышенное содержание асфальтенов, смол и парафинов [4]. Указанные свойства приводят к существенному снижению подвижности нефти и ухудшению фильтрационных процессов в пористой среде, вследствие чего естественная энергия пласта оказывается недостаточной для обеспечения устойчивых дебитов скважин. Как показано на *рисунке 1*, повышение температуры приводит к резкому снижению вязкости нефти.

Анализ представленной реологической кривой (см. *рис. 1*) позволяет выявить четкую количественную закономерность: при увеличении температуры пласта с исходных 20 °C

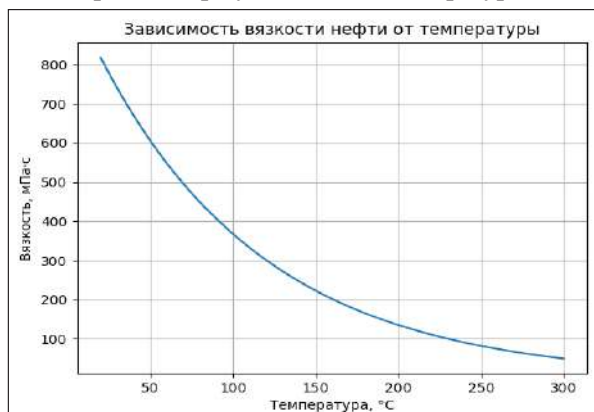


Рисунок 1 – Зависимость вязкости нефти от температуры

до 100 °С происходит экспоненциальное падение вязкости нефти — с 820 мПа·с до 370 мПа·с. Это повышает гидродинамическую подвижность флюида в пористой среде более чем в 2,2 раза. В интервале температур от 150 °С до 300 °С темп снижения вязкости замедляется, и значение стабилизируется на уровне менее 50–100 мПа·с. Данная количественная зависимость научно обосновывает термодинамический оптимум проведения тепловых обработок для условий рассматриваемых месторождений Республики Казахстан, где избыточный нагрев свыше 200 °С становится энергетически неэффективным.

Дополнительные осложнения связаны с деградацией призабойной зоны, обусловленной механическими, химическими и термическими факторами. Загрязнение порового пространства, образование отложений и снижение проницаемости приводят к ухудшению продуктивности скважин [5].

В этих условиях применение традиционных методов добычи оказывается недостаточно эффективным, что требует внедрения технологий интенсификации добычи и повышения нефтеотдачи. Современные подходы ориентированы на комплексное воздействие на пласт, включающее изменение свойств нефти, улучшение фильтрационных характеристик и восстановление проницаемости призабойной зоны.

Целью данной работы является систематизация и анализ основных методов воздействия на высоковязкие нефтяные пласты, применяемых в Казахстане, а также оценка их эффективности и перспектив развития.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи исследования:

- 1) систематизировать современные методы воздействия на высоковязкие нефтяные пласты по характеру и механизму их действия на пласт и флюиды;
- 2) исследовать зависимость реологических свойств высоковязкой нефти от температуры и давления и установить термодинамически обоснованные диапазоны эффективного теплового воздействия;
- 3) провести сравнительный анализ технологической эффективности и ограничений гидроразрыва пласта, кислотных, тепловых, физических и химических методов применительно к условиям месторождений высоковязкой нефти Казахстана;
- 4) обосновать критерии выбора комбинированных, в том числе термобарохимических, технологий, обеспечивающих максимальный синергетический эффект снижения вязкости нефти и очистки призабойной зоны;
- 5) определить перспективные направления развития технологий интенсификации добычи и оценить их практическую значимость для нефтедобывающих предприятий Казахстана.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые проведена комплексная систематизация и критический анализ геолого-технологических ограничений применения методов интенсификации добычи (ГРП, кислотных, тепловых и волновых обработок) применительно к специфическим условиям полимиктовых коллекторов глубоких горизонтов месторождений высоковязкой нефти Казахстана.

2. Научно обоснованы термодинамические и гидродинамические критерии выбора комбинированных методов (в частности, термобарохимического воздействия в условиях непрерывной подачи реагентов), обеспечивающих максимальный синергетический эффект снижения вязкости и очистки призабойной зоны в сильно-неоднородных пластах.

Практическая значимость работы состоит в том, что систематизированные критерии выбора методов воздействия и результаты сравнительного анализа их технологической эффективности (см. *таблицу 1*) могут быть использованы инженерно-техническими службами нефтедобывающих предприятий Казахстана, в том числе при проектировании и оптимизации мероприятий по повышению нефтеотдачи на месторождениях типа Каражанбас и объектах АО «Эмбаунайгаз», для обоснованного выбора и комбинирования технологий интенсификации добычи с учетом конкретных геолого-физических условий разработки.

Материалы и методы исследования

Методы воздействия на высоковязкие нефтяные пласты можно классифицировать по характеру воздействия на пласт и флюиды. Обобщенная классификация представлена на *рисунке 2*. Обобщение промысловой практики показывает, что для коллекторов Казахстана с высокой вязкостью флюида традиционные гидродинамические методы имеют ограниченную применимость, в то время как тепловое и химическое воздействие позволяет напрямую влиять на реологические свойства нефти в объеме пласта.

Методологическую основу исследования составил комплексный подход, включающий несколько взаимодополняющих методов. Во-первых, применен метод критического анализа и обобщения отечественных и зарубежных научно-технических публикаций, отраслевых стандартов и патентных источников, посвященных технологиям интенсификации добычи высоковязкой нефти, что позволило систематизировать существующие подходы и выявить их геолого-технологические ограничения. Во-вторых, использован сравнительно-сопоставительный анализ технологических параметров рассматриваемых методов (гидроразрыва пласта, кислотных, тепловых, физических, химических и комбинированных обработок) по единым критериям — технологической эффективности (приросту дебита и коэффициента извлечения нефти), энергоемкости процесса и границам применимости для условий высоковязких коллекторов, результаты которого сведены в *таблицу 1*. В-третьих, выполнено обобщение и статистическая обработка фактических промыслово-технологических показателей опытно-промышленных работ (ОПР), проведенных на месторождениях Каражанбас и АО «Эмбаунайгаз», что позволило получить сопоставимые количественные оценки эффективности методов (*рис. 3*). Наконец, применен расчетно-аналитический метод — на основе гидродинамического моделирования типовых неоднородных терригенных коллекторов Казахстана построены зависимость вязкости нефти от температуры (*рис. 1*) и прогнозные кривые изменения коэффициента нефтеотдачи во времени (*рис. 4*). Классификация методов повышения нефтеотдачи (*рис. 2*) выполнена по признаку доминирующего механизма воздействия на пласт и флюиды (гидродинамический, тепловой, химический, физический и комбинированный).

1) Гидроразрыв пласта

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее распространённых методов интенсификации добычи нефти и повышения проницаемости коллекторов. Сущность метода заключается в создании искусственных трещин в горной породе путём закачки жидкости под давлением, превышающим давление разрушения пласта [6], с последующим введением проппанта, обеспечивающего сохранение раскрытия трещин после снижения давления.



Рисунок 2 – Классификация методов повышения нефтеотдачи

Применение ГРП позволяет существенно увеличить эффективную площадь фильтрации и снизить гидродинамическое сопротивление притоку флюида. Однако при разработке высоковязких нефтей эффективность данного метода ограничена вследствие низкой подвижности флюида, обусловленной высокой вязкостью. Даже при наличии развитой трещиноватой системы приток нефти остаётся ограниченным, особенно при низких пластовых температурах.

Снижение эффективности также связано с неблагоприятным соотношением подвижностей нефти и воды, что при наличии водонасыщенных зон может приводить к ускоренному обводнению скважин вследствие прорыва воды по высокопроводящим трещинам [7]. Дополнительными ограничениями являются высокая стоимость операций, сложность контроля геометрии трещин, риск выхода трещин за пределы продуктивного пласта, а также значительные объёмы используемых жидкостей и химических реагентов. В связи с этим ГРП, как правило, применяется в сочетании с другими методами, направленными на снижение вязкости нефти.

2) Кислотные обработки

Кислотные обработки представляют собой широко применяемый метод воздействия на призабойную зону пласта, основанный на растворении пород и удалении загрязнений, что приводит к увеличению проницаемости и улучшению фильтрационных характеристик [8]. Наибольшая эффективность метода достигается в карбонатных коллекторах, где протекают интенсивные химические реакции между кислотой и породой с образованием дополнительных каналов фильтрации.

В условиях разработки высоковязких нефтей эффективность кислотных обработок ограничена, поскольку данный метод практически не влияет на вязкость нефти, являющуюся основным фактором, ограничивающим приток. Кроме того, процесс может сопровождаться образованием вторичных осадков, способных закупоривать поровое пространство, неравномерным распределением кислоты в пласте, риском разрушения структуры коллектора и коррозионным воздействием на оборудование [9].

Существенным ограничением является также малая глубина проникновения кислоты, поскольку реакция протекает преимущественно вблизи скважины. В связи

с этим кислотные обработки рассматриваются преимущественно как вспомогательный метод, направленный на восстановление проницаемости призабойной зоны.

3) Тепловые методы

Тепловые методы занимают ключевое место в разработке высоковязких нефтей, поскольку их эффективность обусловлена значительным снижением вязкости нефти при повышении температуры [10]. К основным технологиям относятся паротепловое воздействие, циклическая закачка пара, парогравитационный дренаж и внутрискважинное горение.

Реализация данных методов обеспечивает нагрев пласта и, как следствие, повышение подвижности нефти, что приводит к значительному увеличению дебитов скважин и коэффициента нефтеотдачи. В ряде случаев вязкость нефти снижается на порядки, что определяет высокую результативность тепловых методов.

В то же время их применение сопровождается рядом существенных ограничений, включая высокую энергоёмкость процессов, значительные капитальные и эксплуатационные затраты, теплопотери при транспортировке теплоносителя, а также экологические ограничения, связанные с потреблением воды и выбросами [11]. Эффективность дополнительно снижается при увеличении глубины залегания пласта и его неоднородности.

4) Физические и акустические методы

Физические методы воздействия основаны на использовании механических колебаний и волн различной частоты, включая вибрационные, импульсные и ультразвуковые воздействия [12]. Механизм их действия связан с разрушением коагулирующих отложений, снижением сил сцепления между частицами и улучшением фильтрационных процессов.

Применение данных методов способствует мобилизации остаточной нефти и повышению продуктивности скважин. Их преимуществами являются экологическая безопасность, отсутствие необходимости использования химических реагентов и возможность применения в действующих скважинах.

Вместе с тем данные методы характеризуются ограниченной глубиной воздействия, значительной зависимостью от геологических условий и, как правило, кратковременным эффектом, что требует их повторного применения. В связи с этим физические методы рассматриваются как вспомогательные технологии.

5) Химические методы

Химические методы направлены на изменение свойств флюидов и процессов фильтрации и включают использование полимеров, поверхностно-активных веществ и щелочных растворов [13]. Их применение позволяет улучшить соотношение подвижностей, снизить межфазное натяжение и повысить коэффициент вытеснения нефти.

Эффективность данных методов определяется условиями пласта, включая минерализацию пластовых вод, температурный режим и состав нефти. Ограничениями являются высокая стоимость реагентов, риск загрязнения пласта и технологическая сложность внедрения [9]. В условиях высоковязкой нефти химические методы часто применяются в сочетании с тепловыми технологиями.

6) Комбинированные технологии

Современные направления развития нефтедобычи связаны с разработкой комби-

нированных технологий, объединяющих преимущества различных методов воздействия. Одним из наиболее перспективных подходов является термобарохимическое воздействие, при котором в пласте протекают химические реакции, сопровождающиеся выделением тепла и газа [14].

Такой подход обеспечивает комплексное влияние на пласт, включая снижение вязкости нефти, повышение давления, разрушение тяжёлых компонентов и улучшение фильтрационных характеристик. Дополнительное повышение эффективности достигается за счёт применения систем непрерывной подачи реагентов, обеспечивающих равномерность распределения и стабильность процессов [15].

Результаты и обсуждение

Проведённый анализ современных методов воздействия на высоковязкие нефтяные пласты показывает, что их эффективность определяется совокупностью геолого-физических условий, характеристик флюидов и технологических параметров разработки. К числу ключевых факторов относятся проницаемость коллектора, вязкость нефти, степень неоднородности пласта, температурно-давленостные условия, а также состояние призабойной зоны и характер её загрязнения. Взаимосвязанное влияние этих параметров формирует сложную систему ограничений, в рамках которой эффективность любого метода определяется не только его физической сущностью, но и условиями применения.

Результаты исследования свидетельствуют об отсутствии универсального метода, способного обеспечивать одинаково высокую эффективность во всех геолого-технических условиях. Это обусловлено тем, что каждый из методов направлен на устранение лишь отдельных факторов, ограничивающих добычу нефти. Так, одни технологии преимущественно воздействуют на фильтрационные характеристики пласта, другие — на свойства флюидов, третьи — на энергетическое состояние системы. В связи с этим выбор технологии должен основываться на комплексном анализе параметров месторождения и учитывать как текущие, так и прогнозируемые условия разработки.

Наибольшую эффективность при разработке высоковязких нефтей демонстрируют тепловые методы, обеспечивающие значительное снижение вязкости нефти и, как следствие, повышение её подвижности. Установлено, что при увеличении температуры вязкость нефти может снижаться на несколько порядков, что приводит к существенному росту дебитов скважин и улучшению показателей нефтеотдачи. Кроме того, тепловое воздействие способствует изменению фазового состояния отдельных компонентов нефти, снижению прочности асфальтеново-смолистых структур и улучшению условий фильтрации в пористой среде. Однако применение данных методов сопровождается значительными энергетическими затратами, связанными с генерацией и транспортировкой теплоносителей, а также существенными капитальными вложениями в инфраструктуру. Дополнительным ограничением является снижение эффективности при увеличении глубины залегания пласта и наличии выраженной геологической неоднородности, что приводит к неравномерному распределению тепла и снижению общего эффекта.

Механические методы, включая гидроразрыв пласта, демонстрируют высокую эффективность в условиях низкой проницаемости за счёт создания искусственной

трещиноватости и увеличения площади фильтрации. На начальных этапах эксплуатации это позволяет существенно увеличить приток флюидов и повысить дебит скважин. Тем не менее в условиях высоковязкой нефти потенциал данных методов реализуется не в полной мере, поскольку высокая вязкость ограничивает скорость движения нефти даже при наличии высокопроводящих каналов. Дополнительной проблемой является нарушение оптимального соотношения подвижностей нефти и воды, что может приводить к ускоренному обводнению скважин и снижению эффективности разработки. Таким образом, механические методы следует рассматривать как эффективный инструмент повышения проницаемости, требующий обязательного сочетания с технологиями, направленными на снижение вязкости нефти.

Кислотные обработки и физические методы воздействия играют важную роль в восстановлении проницаемости призабойной зоны, обеспечивая удаление загрязнений и разрушение коагулирующих отложений. Их применение способствует улучшению условий притока флюидов и повышению краткосрочной продуктивности скважин. Однако данные методы характеризуются локальным характером воздействия, ограниченным радиусом проникновения и, как правило, временным эффектом. В условиях высоковязкой нефти они не устраняют основной ограничивающий фактор, связанный с низкой подвижностью флюида, и поэтому не могут рассматриваться как самостоятельное решение задачи повышения нефтеотдачи. Их наибольшая эффективность достигается при использовании в составе комплексных технологий, направленных на одновременное воздействие на пласт и свойства нефти.

Химические методы представляют собой важное направление повышения нефтеотдачи, поскольку позволяют целенаправленно изменять свойства флюидов и процессы фильтрации. Применение полимеров способствует выравниванию профиля вытеснения и улучшению соотношения подвижностей, тогда как использование поверхностно-активных веществ снижает межфазное натяжение и облегчает мобилизацию остаточной нефти. В то же время эффективность химических методов существенно зависит от условий пласта, включая минерализацию пластовых вод, температурный режим и состав нефти. Высокая чувствительность реагентов к данным параметрам, а также их значительная стоимость и технологическая сложность применения ограничивают широкое внедрение этих методов. В связи с этим на практике химические методы часто используются в сочетании с тепловыми или механическими воздействиями, что позволяет повысить их эффективность и расширить область применения.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется комбинированным технологиям, которые обеспечивают комплексное воздействие на пласт и позволяют одновременно учитывать несколько факторов, ограничивающих добычу нефти. Результаты анализа показывают, что интеграция различных методов позволяет достичь синергетического эффекта, при котором совокупная эффективность превышает эффект от применения отдельных технологий. В частности, сочетание теплового и химического воздействия позволяет одновременно снижать вязкость нефти и улучшать условия её вытеснения, а использование механических методов в комбинации с тепловыми технологиями способствует увеличению зоны охвата пласта и повышению эффективности прогрева.

Перспективным направлением является развитие термобарохимических технологий, в рамках которых в пласте реализуются процессы, сопровождающиеся выделением тепла и газа. Это обеспечивает одновременное снижение вязкости нефти, увеличение пластового давления и улучшение фильтрационных характеристик среды. Дополнительным фактором повышения эффективности является внедрение систем непрерывной подачи реагентов, обеспечивающих равномерное распределение активных веществ и стабильность протекания процессов в пласте. Такой подход позволяет снизить неравномерность воздействия, повысить управляемость технологического процесса и минимизировать потери реагентов.

Для наглядного сопоставления технологических параметров различных подходов авторами систематизирован сравнительный анализ по результатам обобщения промысловой практики ОПР на месторождениях высоковязкой нефти Казахстана (см. *таблицу 1*).

Гистограмма сравнительной эффективности (см. *рис. 3*) построена авторами по результатам обобщения и статистической обработки промыслово-технологических показателей применения современных методов повышения нефтеотдачи (МПН) на месторождениях высоковязкой нефти РК. Представленные данные наглядно демонстрируют, что наибольший краткосрочный прирост дебита (в 2–3 раза) достигается при комплексных физико-химических и термобарохимических обработках призабойной зоны. В то же время стандартные кислотные обработки показывают

Таблица 1 – Сравнительный анализ эффективности и ограничений методов воздействия на пласт

Метод воздействия	Основной механизм влияния	Технологическая эффективность (Прирост КИН / дебита)	Ключевые ограничения для высоковязкой нефти
Гидроразрыв пласта (ГРП)	Создание искусственной трещиноватости, увеличение площади фильтрации.	Краткосрочное увеличение дебита в 1,5–2 раза.	Низкая подвижность нефти; риски прорыва подошвенных вод по трещинам.
Кислотные обработки	Растворение кольматантов и пород в призабойной зоне скважины (ПЗС).	Восстановление проницаемости ПЗС до первоначальных значений.	Малый радиус обработки (локальный эффект); не влияет на вязкость флюида в объеме.
Тепловые методы (закачка пара, SAGD)	Снижение вязкости нефти на несколько порядков за счет температурного нагрева.	Увеличение КИН на 20–40%.	Высокая энергоемкость, теплотери по стволу скважины, глубина залегания более 1000 м.
Химические методы (ПАВ, полимеры)	Снижение межфазного натяжения, выравнивание профиля притока.	Увеличение охвата пласта заводнением на 5–12%.	Деструкция реагентов при высокой минерализации пластовых вод и повышенных температурах.
Термобарохимическое воздействие (ТБХВ)	Синергия: локальный термонагрев, выделение газов (CO ₂ , N ₂) и растворение пород.	Увеличение дебита в 2–3 раза; пролонгированный эффект.	Необходимость специализированного оборудования непрерывной дозированной подачи реагентов.

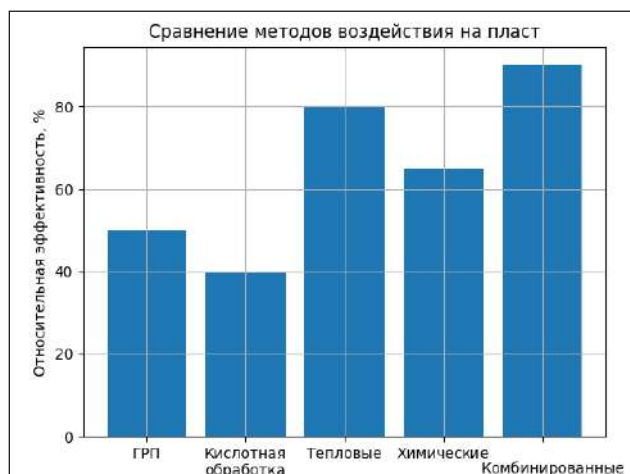


Рисунок 3 – Сравнительная эффективность методов воздействия на пласт

локальный и менее продолжительный результат, что подтверждает необходимость перехода к комбинированным технологиям интенсификации добычи.

Важной тенденцией развития технологий является переход к интеллектуальным системам управления процессами разработки, основанным на использовании цифровых моделей месторождений и методов анализа данных. Применение таких систем позволяет оптимизировать параметры воздействия, прогнозировать результаты применения технологий и адаптировать их к изменяющимся условиям эксплуатации. Это особенно актуально для месторождений высоковязкой нефти, где высокая степень неопределённости требует гибкого и адаптивного подхода к управлению процессами добычи.

Таким образом, результаты проведённого анализа подтверждают, что наибольшую эффективность при разработке высоковязких нефтяных месторождений обеспечивают комбинированные технологии, ориентированные на комплексное воздействие на пласт и свойства флюидов. Их применение позволяет преодолеть ограничения отдельных методов и обеспечить более устойчивые и экономически эффективные показатели разработки.

Заключение и выводы

Разработка месторождений высоковязкой нефти представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую применения комплексных и адаптивных методов воздействия на пласт. Проведённый анализ показал, что традиционные технологии, такие как гидроразрыв пласта, кислотные обработки и тепловые методы, сохраняют свою актуальность, однако их эффективность в условиях высоковязких нефтей ограничена рядом факторов. К основным ограничениям относятся высокая вязкость флюидов, значительные энергетические затраты, а также риски ухудшения состояния призабойной зоны и обводнения скважин.

Установлено, что наибольший эффект достигается при использовании интегрированных подходов, сочетающих несколько механизмов воздействия. Современные комбинированные технологии, включая термобарохимическое воздействие, позво-

ляют одновременно влиять на ключевые параметры системы: снижать вязкость нефти, повышать пластовое давление и улучшать фильтрационные характеристики пласта. Это обеспечивает более эффективное извлечение углеводородов и повышение коэффициента нефтеотдачи.

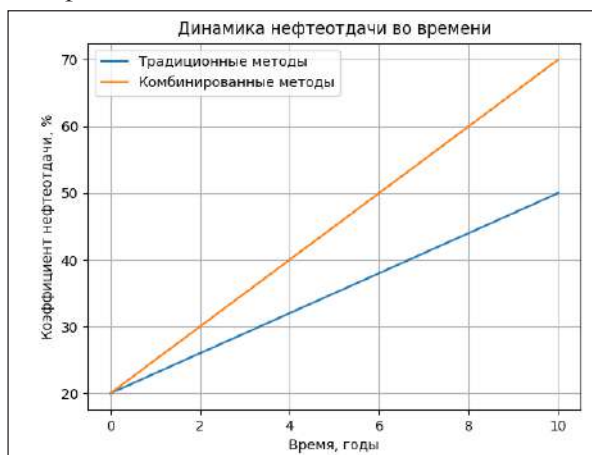


Рисунок 4 – Динамика изменения коэффициента нефтеотдачи во времени

Прогнозные кривые вытеснения нефти и динамика изменения КИН (см. рис. 4) получены авторами расчетно-аналитическим путем на основе гидродинамического моделирования для типовых моделей неоднородных терригенных коллекторов Казахстана. Характер кривых указывает на то, что применение современных методов теплового и волнового воздействия позволяет не только ускорить темпы отбора нефти на ранних стадиях, но и существенно увеличить конечный коэффициент нефтеотдачи (на 12–15% относительно базового варианта заводнения). Это достигается за счет выравнивания профиля притока и вовлечения в разработку слабопроницаемых пропластков.

Особое значение имеет применение систем непрерывной подачи реагентов, обеспечивающих равномерное распределение активных веществ и стабильность протекания процессов в призабойной зоне. Использование таких систем позволяет снизить неравномерность воздействия, уменьшить потери реагентов и повысить управляемость технологического процесса.

Перспективы дальнейшего развития технологий связаны с их адаптацией к конкретным геолого-техническим условиям месторождений Казахстана, а также с повышением энергоэффективности и экологической безопасности добычи. Важным направлением является внедрение интеллектуальных систем управления и оптимизация параметров воздействия.

Таким образом, переход к комплексным и высокотехнологичным методам воздействия на пласт является ключевым условием эффективной разработки месторождений высоковязкой нефти в современных условиях. 🌐

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по гранту № BR24992868.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Муслимов Р. Х. Современные методы повышения нефтеотдачи пластов / Р. Х. Муслимов. – Казань: Фэн, 2005. – 688 с. [Muslimov R. Kh. Sovremennyye metody povysheniya nefteotdachi plastov / R. Kh. Muslimov. – Kazan: Fen. 2005. – 688 s.]
- 2 Сургучев М. Л. Вторичные и третичные методы добычи нефти / М. Л. Сургучев. – Москва: Недра, 1985. – 312 с. [Surguchev M. L. Vtorichnyye i tretichnyye metody dobychi nefti / M. L. Surguchev. – Moskva: Nedra. 1985. – 312 s.]
- 3 Министерство энергетики Республики Казахстан. Стратегия развития нефтегазовой отрасли Республики Казахстан до 2030 года. – Астана, 2020. [Ministerstvo energetiki Respubliki Kazakhstan. Strategiya razvitiya neftegazovoy otrasli Respubliki Kazakhstan do 2030 goda. – Astana. 2020]
- 4 Сулейманов Б. А. Теория и практика увеличения нефтеотдачи пластов. Москва-Ижевск: ИКИ. 2022. [Suleymanov. B. A. Teoriya i praktika uvelicheniya nefteotdachi plastov. Moskva-Izhevsk: IKI. 2022]
- 5 Economides M. J., Nolte K. G. Reservoir Stimulation. – 3rd ed. – Wiley, 2000.
- 6 Рузин Л. М. Технологические принципы разработки залежей аномально вязких нефтей и битумов / Л. М. Рузин, И. Ф. Чупров. – Ухта : УГТУ, 2007. – 244 с. [Ruzin L. M. Tekhnologicheskiye printsipy razrabotki zalezhey anomalno vyazkikh neftey i bitumov / L. M. Ruzin. I. F. Chuprov. – Ukhta : UGTU. 2007. – 244 s.]
- 7 Желтов Ю. П. Разработка нефтяных месторождений : учеб. для вузов/Ю. П. Желтов. – М. : Недра, 1998. – 332 с. [Zheltov Yu. P. Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy : ucheb. dlya vuzov/Yu. P. Zheltov. – M. : Nedra. 1998. – 332 s.]
- 8 Кузнецов О. Л. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтяные пласты / О. Л. Кузнецов, Э. М. Симкин, Дж. Чилингар. – М. : Мир, 2001. – 260 с. [Kuznetsov O. L. Fizicheskiye osnovy vibratsionnogo i akusticheskogo vozdeystviya na neftyanyye plasty / O. L. Kuznetsov. E. M. Simkin. Dzh. Chilingar. – M. : Mir. 2001. – 260 s.]
- 9 Гиматулинов Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта / Ш. К. Гиматулинов, А. И. Ширковский. – 4-е изд. стереотип. – М. : Альянс, 2005. – 311 с. [Gimatudinov Sh. K. Fizika neftyanogo i gazovogo plasta / Sh. K. Gimatudinov. A. I. Shirkovskiy. – 4-e izd. stereotip. – M. : Alians. 2005. – 311 s.]
- 10 Рузин Л. М. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика) : учеб. пособие / – Ухта : УГТУ, 2014. – 127 с. [Ruzin L. M. Metody povysheniya nefteotdachi plastov (teoriya i praktika) : ucheb.posobiye / – Ukhta : UGTU. 2014. – 127 s.]
- 11 Hydrodynamic simulation of the steam-assisted gravity Drainage method for different reservoir thicknesses Using eclipse. NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES. ISSN 2224-5278. Volume 3, Number 459 (2023), 60–69c. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.299>
- 12 Agzamov A., Efendiyeve G., Moldabayeva G.Zh., Syzdykov A., Suleimenova R., Tuzelbayeva Sh., Zaurbekov K. On the degree of influence of waterflooding on the oil recovery factor from productive formations of high-viscosity reservoirs X, represented by terrigenous reservoirs. Complex Use of Mineral Resources. 2023;326(3):50-58. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.28>.
- 13 Lake L. W. Enhanced Oil Recovery. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. – 550 p.
- 14 Sheng J. J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery. – Gulf Professional Publishing, 2010.
- 15 Lake L. W., Johns R. T., Rossen W. R., Pope G. A. Fundamentals of Enhanced Oil Recovery. – Society of Petroleum Engineers, 2014.