

СОЛЕСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ ПРИ ДОБЫЧЕ ГАЗА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

В статье проанализированы физико-химические условия возникновения солей в призабойной зоне пласта и насосно-компрессорных трубах месторождений УВ Восточной Сибири Непско-Ботуобинской антеклизы. Основными солями-кольматантами являются катагенетический галит, гипс, целестин. Предложена система переработки солей на промысле, рассчитаны сроки окупаемости и получение дополнительной прибыли.

Ключевые слова: солеобразование, кольматанты, галит, гипс, целестин.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2026.166

Введение. Восточная Сибирь один из относительно новых и быстро развивающихся нефтегазодобывающих регионов. Формирование минералов в призабойной зоне пласта (ПЗП), в насосно-компрессорных трубах (НКТ) и в наземном оборудовании системы сбора и подготовки приводит к снижению производительности скважин, сокращению межремонтного периода, отказу насосов и другого промышленного оборудования, что, влияет на технико-экономические показатели разработки месторождения.

Одним из главных методов борьбы с образованием солей-кольматантов в ПЗП и НКТ выступает применение ингибиторов. Для правильного применения ингибиторов требуется идентифицировать, какой тип солей будет формироваться, так как ингибиторы узконаправленны.

Цель работы – разработать систему применения соледержащих отходов при добыче углеводородов для использования их в качестве ингибиторов гидратообразования. Задачи – проанализировать физико-химические условия солеотложений в ПЗП и НКТ, предложить систему переработки солей на промысле, рассчитать сроки окупаемости и получение дополнительной прибыли.

Объектом исследований являются месторождения УВ Восточной Сибири Непско-Ботуобинской антеклизы. Разрез представлен венд-нижнекембрийскими терригенно-карбонатным и соленосно-карбонатным комплексами.

Достоверность полученных результатов основана на комплексировании литолого-геохимических методов и математическом моделировании.

Методика и материалы: 1. минеральный состав солей-кольматантов, 2. данные по химическому составу пластовых и подтоварных закачиваемых вод, 3. моделирование процессов гидратообразования с учетом закачиваемых солей-кольматантов. 4. статистическая оценка экономической рентабельности.

Солеотложение – это выпадение из раствора различных соединений неорганического типа, происходящее в результате формирования перенасыщенных растворов как в смеси пластовой и закачиваемой воды (смешение «разнокомпонентных» вод), так и в результате изменения термобарических условий (снижение температуры и давления при подъеме и транспортировке добываемой продукции).

К основным видам кольматантов, которые образуются во время разработки месторождений УВ, относятся: сульфатные соли (гипс, ангидрит, барит, целестин), карбонатные соли (кальцит, магнезит) и хлоридные соли (галит). Обычно встречаются в виде смеси с другими соединениями, редко представлены чистыми разностями.

Отложение хлористого натрия (NaCl) происходит из-за формирования насыщенных растворов хлорида натрия, которые формируются при продвижении вглубь пласта закачиваемой воды, которая растворяет катагенетический галит и постепенно достигает насыщения по NaCl . В результате к добывающей скважине поступает насыщенный солевой раствор, который при снижении термобарических условий, особенно при эксплуатации с использованием давления ниже давления насыщения, что сопровождается дегазацией и испарением раствора, «отдает» часть галита в виде твердого осадка.

Проникновение закачиваемых пресных вод в зону размещения добывающих скважин и их смешение с хлористым натрием приводит к формированию галита, а смешение закачиваемых сульфатных вод с хлоридно-кальциевыми приводит к отложению сульфатных солей. Формирование минералов в ПЗП и НКТ и их вынос в наземном оборудовании может достигать до 650 кг/сут.

На месторождениях Непско-Ботуобинской антеклизы отложения карбонатов фиксируются в виде незначительного налета карбоната кальция менее 1 мм на поверхности погружных насосов. Увеличение интенсивности отложений карбонатов кальция и магния на месторождениях Непско-Ботуобинской антеклизы прогнозируется на заключительных стадиях разработки месторождений в результате снижения

пластового давления ниже давления насыщения, приводящего к снижению парциального давления углекислого газа, необходимого для поддержания карбонатного равновесия.

Отложение гипса происходит в результате смешения закачиваемых вод с высоким содержанием сульфат-иона с хлоридно-кальциевыми водами продуктивных пластов с меньшим содержанием сульфат-иона. Также на увеличение сульфат-иона в растворе может оказывать влияние растворение и выщелачивание сульфат-содержащих минералов продуктивных пластов.

Формирование малорастворимого целестина и практически нерастворимого барита, растворимости которых составляют (в г/л, при стандартных условиях) $1,4 \cdot 10^{-3}$ и $2,3 \cdot 10^{-5}$ соответственно, происходит, потому что барий и стронций являются гидрохимическими аналогами кальция, их накопление в хлоридных рассолах аналогично накоплению кальция. Отложения сульфата бария и сульфата стронция в отличие от гипса практически не растворяются даже сильными кислотами.

Садка барита практически всегда сопровождается образованием радиоактивных осадков радиобарита (Ba(Ra)SO_4), формирование которого связано с изоморфным замещением радием бария в кристаллической решетке BaSO_4 . Этот процесс происходит потому, что радий является геохимическим аналогом бария, содержится всегда в пластовых и остаточных водах нефтегазовых залежей, но не образует самостоятельную минеральную фазу, вследствие крайне малого кларка (Шарилов и др., 2025). Предприятия-недропользователи практически не определяют содержание ионов бария и стронция в пластовых водах.

Одним из решений данной проблемы является закачка получаемых солей в виде водно-метанольного раствора в газосборную систему для борьбы с гидратообразованием.

Математическая модель процессов солеотделения. На настоящее время существуют следующие коммерческие симуляторы (конечно-разностное моделирование), учитывающие PVT-свойства трехфазных смесей: Nysys, Olga, PIP, которые позволяют учитывать полный состав смеси, строить кривые гидратообразования, проводить расчет технологических схем, учитывать растворимые в воде соли. Математическая модель UNIQUAC описывает уравнения состояния жидкостей. Основана на расчёте коэффициентов активности веществ на основе представлений о локальном (молекулярном) составе растворов. Включает также уравнение состояния реального газа – CPA.

Для расчета технологической модели подготовки воды и солевых растворов был взят следующий состав исходной смеси (таблица).

Таблица

Состав исходного раствора для моделирования

Компонент	Моль %
H ₂ O	1,734
MeOH	0,105
NaCl	0,091
KCl	$9,13 \cdot 10^{-4}$
NaBr	$3,67 \cdot 10^{-4}$
CaCl ₂	0,031
KBr	0,004
CaBr ₂	0,004
N ₂	0,611
CO ₂	0,450
CH ₄	92,459
C ₂ H ₆	0,162
C ₃ H ₈	0,056
i-C ₄ H ₁₀	1,073
n-C ₄ H ₁₀	1,073
i-C ₅ H ₁₂	1,073
n-C ₅ H ₁₂	1,073

Состав исходной смеси. Технологическая модель подготовки воды и солевого раствора предполагает включение следующих основных позиций: отделение солей-кольматантов и их складирование будет проводится в установке обессоливания, затем их смешение с водой из емкости с подготовленной водой и метанолом для получения водно-метанольного раствора (ВМР), после чего подача ВМР в систему.

Расчет моделей ректификации и входа в установку комплексной подготовки газа (УКПГ) проводился при следующих параметрах. Выходной газ: температура – 23°C, давление – 5 МПа, температура точки росы для углеводородов – (-19,8)°C, температура точки росы для воды – 22,9°C. В результате получилось регенерированного метанола при температуре – 10,1°C, давлении – 0,36 МПа, массовый расход – 24 т/сут. Данные модели позволяют анализировать кривые гидратообразования, а также затраченное количество энергии на ректификацию ВМР с учетом разбавленных солей.

Для отделения солей-кольматантов предлагается печное выпаривание, электролиз или обратный осмос. Моделирование выпаривания воды в ПО Hysys позволило рассчитать следующие остаточные параметры. Входная вода: температура – 70 0C, давление – 0,109 МПа, объемный расход – 160,4 тыс. м³/сут. Пары: температура – 120 0C, давление – 0,109 МПа, объемный расход – 149,2 тыс. м³/сут, молярная доля воды – 1. Остаточная соль: массовый расход – 27,3 т/сут, молярная доля

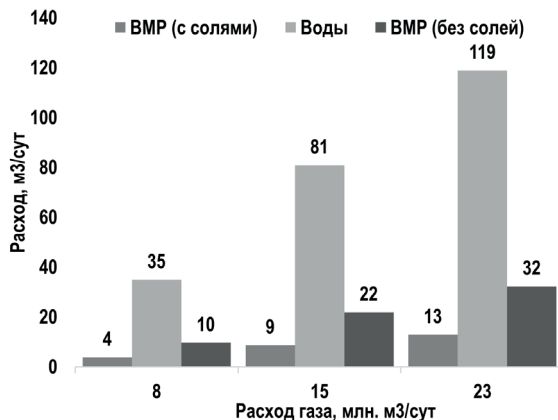


Рис. 1. Влияние наличия солей-кольматантов в ВМР на оптимизацию ингибирования гидратообразования

солей – 0,99. Моделирование мембранного электролиза в ПО Hysys позволило рассчитать следующие остаточные параметры. Вход на обессоливание: массовый выход ВМР – 95 т/сут. Выход очищенной воды: массовый выход очищенной воды – 70 т/сут. Спецификация электролиза в ПО Hysys: мощность – 3200 КВт/час, толщина катода – 25 мм, толщина анода – 25 мм, расстояние между катодом и мембраной – 1,25 мм, пористость – 0,3.

Анализ и оптимизация рисков образования газогидратов при закачке в систему сбора и подготовки ВМР показал, что расход газа при использовании ВМР снижается почти на 40%, а количество ВМР, расходуемого на подготовку, снижается более чем в два раза (в м³/сут) по сравнению с использованием чистого метанола (рис. 1).

Анализ экономического эффекта позволил рассчитать кривые CAPEX, OPEX и NPV (рис. 2) при вводе установки с 2026 года. NPV (чистая приведённая стоимость) составит 167 млн. руб. PI (индекс доходности инвестиций) составит 1,1. OPEX (операционные расходы) выровняются к 2028 году, CAPEX (капитальные затраты) к 2028 году полностью нивелируются.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Для венд-нижнекембрийских отложений месторождений УВ Непско-Ботоубинской антеклизы существует риск образования кольматантов: сульфатных солей кальция, бария и хлоридных солей натрия, магния и кальция вследствие смешения вод с разным химическим составом (подтоварной и пластовой). Моделирование

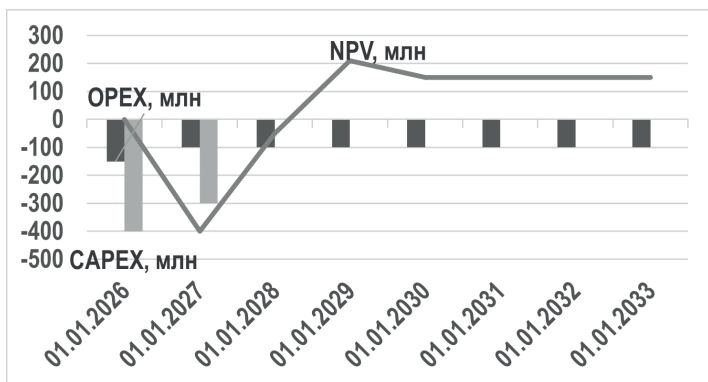


Рис. 2. Анализ экономического эффекта

процессов подготовки ВМР: солевого раствора, воды и метанола, позволило рассчитать полный технологический процесс солеотделения и эффективности установок. Максимальный экономический эффект от закачки ВМР с добавлением солей-кольматантов состоит в уменьшении потребления метанола в качестве ингибитора гидратообразования. Рекомендуется учитывать наличие солей-кольматантов и возможность их использования в качестве дополнительного компонента при ингибировании гидратообразования месторождений УВ Восточной Сибири.

Библиографический список

Шаринов Ф.А., Вобликова Е.Ю., Киреева Т.А., Мухаметишин В.Ш., Гилязетдинов Р.А. Прогноз отложения сульфатных солей кальция, бария и стронция при разработке нефтегазоконденсатного месторождения Непско-Ботуобинской антеклизы (Восточная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 69–77.

SALT-CONTAINING WASTE FROM GAS EXTRACTION IN EASTERN SIBERIA

M.V. Solomon

*Saratov National Research State University
named after N.G. Chernyshevsky, Saratov
solomonmv@list.ru*

Annotation: the article analyzes the physico-chemical conditions of the occurrence of salts in the bottom-hole zone of the formation and the pumping and compressor pipes of the hydrocarbon deposits of Eastern Siberia Nepsko-Botuobinskaya antecline. The main colmatant salts are catagenetic halite, gypsum, and celestine. A salt processing system has been proposed in the field, payback periods and additional profit have been calculated.

Keywords: salt formation, colmatants, halite, gypsum, celestine.