

УДК 622.279:550.4:622.692.4
DOI 10.56525/UFHV4151

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ И МОНИТОРИНГ РИСКОВ ГАЗОСБОРНОЙ СЕТИ «ШАХПАХТЫ»

Реймов М.Р.

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха (КГУ),
Нукус, Каракалпакстан, Узбекистан
e-mail: mreymov@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены гидрогеохимические и технологические предпосылки формирования минеральных отложений на поздней стадии эксплуатации газового месторождения «Шахпахты». Показано, что основными факторами риска являются рост обводненности продукции, вертикальная неоднородность состава пластовых вод, смешение флюидов разных горизонтов, локальные перепады давления и охлаждение влажного газа в газосборной сети. На основе анализа опубликованных и проектных данных, а также фактических наблюдений за зарастанием трубопровода выделены наиболее опасные элементы промысловой системы: переходы диаметров, дросселирующие узлы, места соединения потоков, пониженные участки накопления жидкости и зоны охлаждения. Обоснована необходимость перехода от эпизодической очистки трубопроводов к узловому мониторингу, включающему регулярный отбор проб пластовых вод и твердых отложений, контроль давления и температуры, минералогическую диагностику осадков и ведение карты проблемных участков. Предложенный подход позволяет повысить надежность работы газосборной сети, своевременно выявлять зоны интенсивного солеотложения, определять приоритетность профилактических мероприятий и оптимизировать периодичность очистки трубопроводов с учетом изменения условий эксплуатации месторождения. Результаты могут использоваться при регламентировании контроля, диагностике оборудования и планировании ремонтных работ.

Ключевые слова: газовое месторождение, Шахпахты, пластовые воды, поздняя стадия разработки, солеотложение, гидрогеохимия, газосборная сеть, узлы риска, мониторинг.

Введение

Поздняя стадия эксплуатации газовых месторождений сопровождается постепенным изменением гидродинамического режима залежи и наземной системы сбора продукции. По мере истощения запасов газа возрастает доля пластовой воды, усиливается неравномерность поступления флюидов из отдельных горизонтов, изменяются давление, температура и газожидкостное соотношение. В этих условиях повышается вероятность выпадения минеральных солей на внутренней поверхности труб, арматуры, штуцеров, клапанов и другого промыслового оборудования. Даже сравнительно тонкий слой осадка способен заметно изменить гидравлический режим, а при длительном развитии процесса формируются кольцевые отложения, резко уменьшающие проходное сечение трубопровода.

Образование неорганических солей в системах добычи и подготовки углеводородов является результатом совместного влияния химического состава воды, степени насыщения раствора, изменения температуры, давления, pH, испарительного концентрирования, дегазации и смешения вод различного происхождения [1, 2]. В промысловых условиях эти факторы редко действуют изолированно. Наиболее опасными являются зоны, где одновременно происходят турбулизация потока, локальное падение давления, снижение температуры и контакт вод контрастного состава. Поэтому диагностика солеотложения должна учитывать не только общий химический состав пластовых вод, но и

пространственное положение технологических узлов, в которых создаются условия для ускоренной кристаллизации солей.

Для газового месторождения «Шахпахты» проблема имеет выраженное прикладное значение. Месторождение эксплуатируется длительное время, находится на поздней стадии разработки и характеризуется осложнениями, связанными с ростом обводненности и поступлением пластовых вод из разных горизонтов. В этих условиях солеотложение становится не единичным локальным дефектом, а системным фактором снижения надежности газосборной сети. Фактические промысловые наблюдения показывают, что на отдельных участках трубопроводов происходит значительное зарастание внутреннего сечения. По имеющимся данным, при номинальном внутреннем диаметре трубы около 400 мм свободный диаметр может уменьшаться примерно до 150 мм, что соответствует потере живого сечения порядка 86 %. Такое сокращение сечения приводит к росту гидравлического сопротивления, увеличению перепада давления, ухудшению условий транспорта влажного газа и необходимости внеплановых очистных мероприятий [3].

Актуальность исследования определяется необходимостью перехода от реагирования на уже сформировавшиеся отложения к раннему выявлению узлов риска. Для этого требуется совместное рассмотрение гидрогеохимических данных по пластовым водам, промысловых наблюдений, особенностей схемы газосборной сети и технологических условий транспорта продукции. Такой подход особенно важен для месторождений поздней стадии разработки, где эксплуатационные осложнения часто развиваются неравномерно и концентрируются в отдельных узлах.

Цель настоящей работы заключается в научном обосновании гидрогеохимических предпосылок солеотложения и выделении приоритетных узлов риска в газосборной сети месторождения «Шахпахты» для последующей организации адресного мониторинга и профилактических мероприятий.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на основе обобщения геолого-промысловых, гидрогеохимических и технологических данных по месторождению «Шахпахты». В качестве исходной информационной базы использованы сведения о составе пластовых вод по продуктивным горизонтам, диапазонах минерализации, содержании основных ионов, плотности вод, а также данные эксплуатационных наблюдений, характеризующие участки интенсивного зарастания газосборных трубопроводов. Дополнительно учитывались литературные сведения о механизмах образования минеральных отложений в нефтегазопромысловых системах и подходах к лабораторной оценке эффективности ингибиторов солеотложения [1, 4].

Принципиальным методическим положением является рассмотрение солеотложения как процесса, возникающего на границе гидрогеохимической и технологической подсистем. С одной стороны, состав пластовой воды определяет потенциальную способность к образованию осадков. С другой стороны, конкретное место выпадения солей задается конструкцией и режимом работы промысловой сети: перепадами давления, скоростью потока, температурой, наличием застойных зон и участков переменного смачивания. Поэтому оценка риска должна проводиться не только по анализу воды, но и по каждому технологическому узлу, где меняется режим движения газожидкостной смеси.

Для приближенной количественной оценки степени перекрытия трубопровода использовано отношение площадей живого сечения. При уменьшении свободного диаметра с 400 до 150 мм доля сохранившегося сечения составляет $(150/400)^2$, то есть около 14,1 % от исходного значения. Следовательно, потеря живого сечения достигает примерно 85,9 %. Этот расчет показывает, что даже при сохранении внешней целостности трубопровода его фактическая пропускная способность может существенно снижаться.

Гидрогеохимическая характеристика пластовых вод

Анализ пластовых вод по разрезу месторождения показывает выраженную вертикальную неоднородность гидрогеохимических условий. Среднеюрские горизонты

VIIa, VIII и VI характеризуются сравнительно низкой минерализацией, тогда как горизонты IV, IIIa, III, II и I представлены значительно более минерализованными водами и рассолами. Такая контрастность состава является важнейшей предпосылкой осложнений, поскольку при совместном поступлении вод из разных интервалов возрастает вероятность нарушения равновесия растворов.

Для группы горизонтов VIIa-VIII-VI по имеющимся данным характерны значения общей минерализации порядка 2,54-6,37 г/л. В составе вод отмечаются хлориды, кальций, магний и сумма натрия с калием, а также отдельные микрокомпоненты. Эти воды по абсолютной минерализации существенно уступают более глубоким или иным продуктивным интервалам, однако при смешении с высокоминерализованными рассолами могут участвовать в изменении ионных соотношений и степени насыщения раствора по отдельным минеральным фазам.

Горизонты IV, IIIa, III, II и I отличаются более высокой минерализацией, которая по проектным и обобщенным данным достигает порядка 160-196 г/л и более. Для подобных рассолов характерны повышенные концентрации хлоридов, натрия, кальция, а в отдельных случаях сульфатов и гидрокарбонатов. Именно такие растворы при изменении температуры и давления способны формировать интенсивные отложения хлорида натрия, сульфатов кальция, карбонатных фаз и смешанных минеральных агрегатов. В промысловых условиях состав твердого осадка может быть неоднородным и изменяться по длине трубопровода, что требует его лабораторной диагностики.

Особое значение имеет не только абсолютная минерализация, но и контрастность вод, поступающих в систему сбора. Воды разных горизонтов могут находиться в относительном равновесии в пластовых условиях, но при подъеме на поверхность, охлаждении, дегазации и смешении их устойчивость резко меняется. При этом даже небольшое изменение температуры или давления в узле дросселирования способно перевести раствор в пересыщенное состояние. Следовательно, зоны контакта потоков из разных горизонтов должны рассматриваться как один из главных объектов мониторинга.

Таблица 1 – Обобщенная гидрогеохимическая характеристика пластовых вод месторождения «Шахпахты»

Группа горизонтов	Гидрогеохимическая характеристика	Практическое значение для солеотложения
VIIa-VIII-VI	Сравнительно низкая минерализация: около 2,54-6,37 г/л; присутствуют Cl ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na+K и отдельные микрокомпоненты.	При самостоятельном поступлении риск ниже, но при смешении с высокоминерализованными рассолами меняется ионное равновесие и возрастает вероятность выпадения осадков.
IV, IIIa, III, II, I	Высокоминерализованные воды и рассолы: в среднем порядка 160-196 г/л и более; повышенные содержания хлоридов, натрия, кальция, местами сульфатов и гидрокарбонатов.	Основная группа вод, определяющая высокий потенциал образования NaCl, CaSO ₄ , карбонатных и смешанных минеральных отложений.
Узлы смешения потоков	Контакт вод различной минерализации и ионного состава, сопровождаемый изменением температуры, давления и газожидкостного режима.	Наиболее вероятные места перехода раствора в пересыщенное состояние и начала интенсивного зарастания трубопроводов.

Примечание. Таблица составлена по обобщенным данным проектной и промысловой документации; при внедрении мониторинга значения должны уточняться по результатам регулярного отбора проб воды и анализа твердых отложений.

Технологические предпосылки образования отложений

Гидрогеохимическая предрасположенность к солеотложению реализуется не по всей длине газосборной сети одинаково. В реальных условиях выпадение минеральных фаз имеет узловой характер и концентрируется на участках, где происходят резкие изменения режима движения газожидкостной смеси. Это объясняет, почему при одинаковом составе поступающей воды одни участки трубопровода остаются относительно чистыми, а другие быстро зарастают кольцевыми отложениями.

Первую группу опасных участков составляют переходы диаметров, отводы, тройники и места соединения потоков. В таких точках изменяются скорость, турбулентность и структура газожидкостного потока. Если одновременно происходит смешение вод из разных горизонтов, то химический фактор усиливается гидродинамическим. Именно поэтому узлы соединения потоков должны рассматриваться не только как элементы трубопроводной схемы, но и как геохимические реакторы, в которых создаются условия для выпадения солей.

Вторую группу представляют штуцеры, клапаны, дросселирующие устройства и арматура, где происходит локальное снижение давления. Перепад давления влияет на дегазацию, изменение pH, испарительное концентрирование жидкой фазы и температуру потока. В зависимости от состава воды это может ускорить выпадение карбонатов, сульфатов или хлоридных солей. Кроме того, геометрия таких узлов способствует задержанию первичных кристаллов и формированию центров дальнейшего нарастания осадка.

Третью группу составляют участки охлаждения влажного газа, особенно в зимний период или на открытых участках сети с интенсивным теплообменом. Снижение температуры меняет растворимость отдельных солей и может приводить к кристаллизации тех фаз, которые оставались растворенными при более высоких температурах. В сочетании с пониженной скоростью потока и наличием капельной жидкости это создает условия для закрепления солевых агрегатов на стенках труб.

Таблица 2 – Приоритетные узлы риска солеотложения в газосборной сети

Узел риска	Ведущий механизм	Полевые признаки	Контрольные мероприятия
Переходы диаметров	Изменение скорости и турбулентности потока	Рост перепада давления, шум, неустойчивый режим транспорта	Замер давления до и после узла, осмотр при остановках, отбор отложений
Штуцеры, клапаны, дроссели	Локальное падение давления и дегазация	Быстрое сужение прохода, частая необходимость прочистки	Контроль ΔP , температуры, анализ состава воды до и после узла
Места соединения потоков	Смешение вод контрастного состава	Появление новых осадков после изменения режима эксплуатации	Раздельный отбор проб по линиям, построение матрицы смешения
Участки охлаждения влажного газа	Снижение растворимости солей и конденсация влаги	Сезонное усиление осложнений, накопление жидкости	Температурный мониторинг, утепление, дренаж жидкости

Пониженные и застойные участки	Увеличение времени контакта воды со стенкой трубы	Накопление жидкости, коррозионно-солевые продукты	Регулярный дренаж, контроль уровня жидкости, периодическая очистка
--------------------------------	---	---	--

Оценка фактического зарастания трубопровода

Фактические данные по зарастанию трубопровода являются важным подтверждением практической значимости рассматриваемой проблемы. В случае, когда свободный диаметр трубопровода уменьшается с 400 до 150 мм, визуально может сохраняться протяженная кольцевая форма канала, однако гидравлически такая труба уже не соответствует проектному диаметру. Площадь живого сечения изменяется пропорционально квадрату диаметра, поэтому даже умеренное по абсолютной величине уменьшение диаметра приводит к резкому снижению пропускной способности.

При исходном диаметре 400 мм площадь сечения пропорциональна 160000 условным единицам, а при свободном диаметре 150 мм - только 22500. Таким образом, сохраняется около 14,1 % исходного сечения, а потери составляют около 85,9 %. Для газосборной сети это означает не только снижение расхода, но и существенное изменение режима движения газа и жидкости. Возрастает перепад давления, увеличивается вероятность вторичного накопления жидкости перед суженным участком, усиливается турбулизация и создаются условия для ускоренного нарастания отложений.

Такой эффект имеет самоподдерживающийся характер. Начальное образование солевого слоя уменьшает сечение, уменьшение сечения меняет гидродинамику, а измененная гидродинамика ускоряет дальнейшее осаждение. В результате проблемный участок может перейти из состояния умеренного загрязнения в состояние почти критического сужения за сравнительно короткий эксплуатационный период. Именно поэтому для поздней стадии разработки месторождения особенно важна ранняя диагностика, а не только очистка после возникновения аварийного или предаварийного состояния.

Узловой мониторинг и профилактика

Для условий месторождения «Шахпахты» целесообразно организовать мониторинг по узловому принципу. Его сущность состоит в том, что наблюдения концентрируются не на всей сети равномерно, а на заранее выбранных точках повышенного риска. В перечень таких точек должны входить узлы смешения потоков из разных горизонтов, переходы диаметров, дросселирующие элементы, участки охлаждения влажного газа, пониженные участки и места, где ранее фиксировалось зарастание трубопровода. Такой подход позволяет рационально использовать лабораторные и эксплуатационные ресурсы, не снижая надежности диагностики.

Первым элементом системы мониторинга является регулярный гидрохимический контроль пластовых и попутных вод. Для каждой контрольной точки необходимо определять минерализацию, pH, плотность, содержание хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция, магния, натрия и калия. При наличии технической возможности следует также учитывать барий, стронций, железо и другие компоненты, способные участвовать в формировании труднорастворимых солей. Периодичность отбора проб должна повышаться после изменения режима эксплуатации, подключения новых скважин, роста обводненности или появления признаков увеличения перепада давления.

Третьим элементом является технологический контроль. На каждом проблемном узле следует фиксировать давление до и после узла, температуру, наличие жидкости, периодичность дренажа, дату последней очистки и фактический характер извлеченных отложений. Динамика перепада давления может служить оперативным индикатором прогрессирующего сужения. Если рост ΔP сопровождается изменением состава воды или режима работы скважин, такой участок должен быть переведен в категорию повышенного риска.

Профилактические мероприятия должны выбираться с учетом установленного типа отложений. Если преобладают хлоридные соли, приоритетное значение имеют контроль водного режима, предотвращение локального испарительного концентрирования и своевременный дренаж жидкости. При сульфатных и карбонатных отложениях возрастает роль ингибиторной обработки, контроля pH, смешения вод и термобарических условий. В любом случае применение ингибиторов должно предваряться лабораторной проверкой, поскольку эффективность реагентов зависит от конкретного состава воды и фактического минерального состава осадка [4, 5].

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что солеотложение на месторождении «Шахпахты» нельзя рассматривать только как следствие высокой минерализации пластовых вод. Высокая минерализация создает общую предпосылку, но фактическая локализация осложнений определяется сочетанием геохимических и технологических факторов. Наиболее опасными являются узлы, где одновременно проявляются контрастность состава вод, локальное падение давления, охлаждение и задержание жидкой фазы. Это объясняет необходимость перехода к интегральной оценке, в которой анализ воды, промысловый режим и конструкция сети рассматриваются совместно.

Практическое преимущество предложенного подхода заключается в его применимости без сложного математического моделирования на начальном этапе. Для ранжирования узлов риска достаточно систематизировать данные о составе вод, режимах работы, перепадах давления и фактах извлечения твердых отложений. В дальнейшем эта система может быть расширена за счет расчета индексов насыщения, построения матрицы смешения вод разных горизонтов и цифрового моделирования процессов осадкообразования. Однако уже на первом этапе она позволяет выделить первоочередные точки контроля и уменьшить долю внеплановых работ.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

1. На поздней стадии эксплуатации месторождения «Шахпахты» формирование минеральных отложений определяется совместным действием гидрогеохимических и технологических факторов. Рост обводненности, поступление вод из разных горизонтов и изменение термобарических условий повышают вероятность выпадения солей в газосборной сети.

2. Пластовые воды месторождения характеризуются выраженной вертикальной неоднородностью. Сравнительно слабоминерализованные воды горизонтов VIIa-VIII-VI и высокоминерализованные рассолы верхних и иных продуктивных интервалов при смешении могут создавать условия для потери устойчивости раствора и образования хлоридных, сульфатных, карбонатных и смешанных отложений.

3. Наиболее опасными элементами промысловой сети являются переходы диаметров, штуцеры, клапаны, дросселирующие устройства, места соединения потоков из разных горизонтов, участки охлаждения влажного газа и зоны накопления жидкости. Именно здесь геохимические предпосылки усиливаются перепадами давления, изменением скорости потока и снижением температуры.

4. Фактическое уменьшение свободного диаметра трубопровода с 400 до 150 мм соответствует потере живого сечения около 86 %, что подтверждает высокую степень технологического риска и необходимость раннего выявления проблемных участков.

5. Для повышения надежности газосборной сети целесообразно внедрить узловой мониторинг, включающий регулярный отбор проб вод и твердых отложений, лабораторную диагностику минерального состава, контроль давления и температуры до и после узлов риска, а также ведение цифровой карты проблемных участков.

6. Предложенный подход может служить основой для последующей разработки адресных профилактических мероприятий, выбора ингибиторной обработки и оценки эффективности очистки трубопроводов на поздней стадии разработки месторождения.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oddo J.E., Tomson M.B. Why Scale Forms in the Oil Field and Methods To Predict It // SPE Production & Facilities. 1994. Vol. 9, No. 1. P. 47-54.
2. Кащавцев В.Е., Мищенко И.Т. Солеобразование при добыче нефти. М.: Орбита-М, 2004. 432 с.
3. Реймов М.Р. Минеральные (солевые) отложения на поздней стадии разработки газового месторождения «Шахпахты»: диагностика и мониторинг // Международная научно-техническая конференция «Международный опыт: рациональное использование ресурсов недр на основе применения цифровых технологий и инновационных методов». Ташкент, 2026. С. 236-238.
4. NACE International. Laboratory Screening Tests to Determine the Ability of Scale Inhibitors to Prevent the Precipitation of CaCO_3 , CaSO_4 and BaSO_4 from Oilfield Brines. NACE Standard TM0374-2001. Houston, 2001.
5. Сыртланов А.Ш., Фасхутдинов Р.А., Шайдуллин Г.Ш. и др. Пути повышения эффективности предотвращения образования отложений неорганических солей в скважинах // Нефтяное хозяйство. 2002. № 4. С. 59-61.
6. Турсунов М.А., Абдирзаков А.И., Норинов Ф.К., Кенжаев К.Ш. Новый ингибитор солеотложения для нефтяных месторождений // Innovatsion texnologiyalar. Спецвыпуск, декабрь 2023. С. 3-10.
7. Проект доработки месторождения Шахпахты. Ташкент, 2003.

«ШАХПАХТЫ» ГАЗ КЕН ОРНЫНЫҢ ГАЗ ЖИНАУ ЖЕЛІСІНДЕГІ ТӘУЕКЕЛДЕРДІ МОНИТОРИНГТЕУ ЖӘНЕ ТҰЗ ШӨГҮІНІҢ ГИДРОГЕОХИМИЯЛЫҚ АЛҒЫШАРТТАРЫ

М.Р. Реймов

Бердақ атындағы Қарақалпақ мемлекеттік университеті (ҚМУ),
Нөкіс, Қарақалпақстан, Өзбекстан
e-mail: mreymov@mail.ru

Андатпа. Мақалада «Шахпахты» газ кен орнын игерудің соңғы кезеңінде минералдық шөгінділердің түзілуінің гидрогеохимиялық және технологиялық алғышарттары қарастырылған. Өнімнің сулануының артуы, қабат сулары құрамының тік бағыттағы әркелкілігі, әртүрлі горизонттардан келетін флюидтердің араласуы, қысымның жергілікті ауытқулары және газ жинау желісіндегі ылғалды газдың салқындауы тәуекелдің негізгі факторлары болып табылатыны көрсетілген. Жарияланған және жобалық деректерді, сондай-ақ құбырдың бітелуіне қатысты нақты бақылау нәтижелерін талдау негізінде кәсіпшілік жүйенің ең қауіпті элементтері: диаметрлердің ауысу орындары, дроссельдік тораптар, ағындардың қосылу орындары, сұйықтық жиналатын төмен учаскелер және салқындату аймақтары анықталды. Құбырларды эпизодтық тазалаудан тораптық мониторингке көшу қажеттілігі негізделді. Ол қабат сулары мен қатты шөгінділерден тұрақты түрде сынама алуды, қысым мен температураны бақылауды, шөгінділерге минералогиялық диагностика жүргізуді және проблемалық учаскелер картасын жүргізуді қамтиды. Ұсынылған тәсіл газ жинау желісінің сенімділігін арттыруға, қарқынды тұз шөгетін аймақтарды уақтылы анықтауға, профилактикалық іс-шаралардың басымдығын айқындауға және кен орнын пайдалану жағдайларының өзгеруін ескере отырып, құбырларды тазалау мерзімділігін оңтайландыруға мүмкіндік береді. Нәтижелер бақылау регламенттерін әзірлеуде, жабдықтарды диагностикалауда және жөндеу жұмыстарын жоспарлауда пайдаланылуы мүмкін.

Тўйин сөздер: газ кен орны, Шахпахты, қабат сулары, игерудің соңғы кезеңі, тұз шөгуі, гидрогеохимия, газ жинау желісі, тәуекел тораптары, мониторинг.

HYDROGEOCHEMICAL PRECONDITIONS FOR SALT DEPOSITION AND RISK MONITORING IN THE GAS GATHERING NETWORK OF THE SHAKHPakhty FIELD

M.R. Reymov

Karakalpak State University named after Berdakh (KSU),
Nukus, Karakalpakstan, Uzbekistan
e-mail: mreymov@mail.ru

Abstract. The article examines the hydrogeochemical and technological preconditions for the formation of mineral deposits during the late stage of development of the Shakhpakhty gas field. The main risk factors are identified as increasing water cut of production, vertical heterogeneity in the composition of formation waters, mixing of fluids from different horizons, local pressure fluctuations, and cooling of wet gas in the gas gathering network. Based on an analysis of published and design data, as well as field observations of pipeline fouling, the most critical elements of the production system were identified, including diameter transitions, throttling units, flow junctions, low-lying sections where liquids accumulate, and cooling zones. The need to move from episodic pipeline cleaning to node-based monitoring is substantiated. This approach includes regular sampling of formation water and solid deposits, pressure and temperature control, mineralogical analysis of deposits, and maintaining a map of problematic sections. The proposed approach can improve the reliability of the gas gathering network, enable timely identification of areas with intensive salt deposition, prioritize preventive measures, and optimize pipeline cleaning intervals considering changes in field operating conditions. The results can be used to establish monitoring procedures, diagnose equipment, and plan maintenance activities.

Keywords: gas field, Shakhpakhty, formation waters, late-stage development, salt deposition, hydrogeochemistry, gas gathering network, risk nodes, monitoring.