Статья поступила в редакцию: 23.09.2026
Статья принята к публикации: 01.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 553.98+661.9

DOI: 10.32743/UniChem.2026.149.11.23493

Механизм образования ядра гидрата в среде природного газа

Утемуратов Бердах Муратбаевич
независимый соискатель
совместное предприятие ОАО Uz-Kor Gas Chemical Утемисов
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Тураев Толиб Бозорович
д-р техн. наук, проф.
кафедры Химическая технология переработки нефти и газа
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Менглиев Шерзод Шойимович
заведующий кафедрой
химической технологии переработки нефти и газа
Ташкентский химико-технологический институт,
доктор философии (PhD) по техническим наукам
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Игамкулова Наргиса Абдувалиевна
канд. техн. наук, доц.
кафедры химической технологии переработки нефти и газа
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Рахимов Хусниддин Нурбобоевич
д-р философии (PhD) по техн. наукам, доц.
кафедры химической технологии переработки нефти и газа
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Сапаров Бобур Жумабаевич
главный специалист отдела контроля качества образования
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Жураев Шохрух
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: 0065shj@gmail.com

Библиографическое описание: Механизм образования ядра гидрата в среде природного газа // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Утемуратов Б.М. [и др.]. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23493

Mechanism of hydrate nucleus formation in a natural gas medium

Utemuratov Berdakh Muratbaevich
Independent Researcher
JV Uz-Kor Gas Chemical
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Turaev Tolib Bozorovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Chemical Technology of Oil and Gas
Processing Tashkent Chemical-Technological Institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mengliyev Sherzod Shoimovich
Head of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
Tashkent Institute of Chemical Technology
doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Igamkulova Nargisa Abduvalievna
Associate Professor
Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
Tashkent Institute of Chemical Technology
candidate of Technical Sciences
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Rakhimov Khusniddin Nurboboevich
Associate Professor,
Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing,
Tashkent Institute of Chemical Technology,
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Saparov Bobur Jumabaevich
Chief Specialist,
Department of Education Quality Control,
Tashkent Institute of Chemical Technology,
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Juraev Shokhruh
PhD student (basic doctoral student)
Tashkent Institute of Chemical Technolog,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Образование ядра гидрата в среде природного газа представляет собой сложный многостадийный физико-химический процесс, протекающий при взаимодействии компонентов газа, воды, температуры и давления. Целью статьи является анализ механизма образования ядра гидрата в системе «природный газ–вода» с термодинамической и молекулярной точек зрения, а также определение основных факторов, влияющих на нуклеацию и последующий рост гидратных кристаллов. Исследование выполнено на основе систематического обобщения научной литературы, термодинамического анализа и сравнительной оценки молекулярных механизмов, представленных в исследованиях по классической теории нуклеации, фазовым равновесиям гидратов, индукционному периоду и молекулярной динамике. Показано, что начальная стадия процесса связана с образованием свободной воды, кластеризацией молекул воды и формированием упорядоченных клатратных структур. После достижения критического размера ядра в его полости проникают молекулы

гидратообразующих компонентов природного газа, включая CH_4, CO_2 и H_2S, что способствует стабилизации кристаллической структуры и её дальнейшему росту. Установлено влияние давления, температуры и содержания свободной воды на вероятность образования гидратов. Рассмотрены стадии роста, агломерации и прилипания гидратных частиц к стенкам трубопроводов, приводящие к уменьшению проходного сечения и увеличению потерь давления. Полученные результаты имеют значение для совершенствования подготовки и транспортировки природного газа и предупреждения гидратообразования.

Abstract

The formation of a hydrate nucleus in a natural gas medium is a complex multistage physicochemical process governed by the interaction of gas components, water, temperature, and pressure. The aim of this study is to analyze the mechanism of hydrate nucleus formation in the natural gas–water system from thermodynamic and molecular perspectives and to identify the main factors affecting nucleation and subsequent hydrate crystal growth. The study is based on a systematic review of scientific literature, thermodynamic analysis, and a comparative assessment of molecular mechanisms described in studies of classical nucleation theory, hydrate phase equilibria, induction periods, and molecular dynamics. It was established that the initial stage of the process involves the formation of free water, clustering of water molecules, and development of ordered clathrate structures. After the hydrate nucleus reaches a critical size, molecules of hydrate-forming components of natural gas, including CH_4, CO_2, and H_2S, enter the cavities, contributing to the stabilization of the crystal structure and its further growth. The influence of pressure, temperature, and free-water content on hydrate formation was considered. The stages of crystal growth, agglomeration, and adhesion of hydrate particles to pipeline walls were also analyzed. These processes may reduce the flow cross-section and increase pressure losses. The results provide a scientific basis for improving natural gas preparation and transportation processes and for preventing hydrate formation in technological systems.

Ключевые слова: природный газ, газовые гидраты, нуклеация, ядро гидрата, метан, сероводород, клатратная структура.

Keywords: natural gas, gas hydrates, nucleation, hydrate nucleus, methane, hydrogen sulfide, clathrate structure.

Введение

При подготовке природного газа и его транспортировке по трубопроводам фазовое состояние системы газ–вода имеет важное значение. При определённых значениях температуры и давления в присутствии воды и газовых компонентов, способных образовывать гидраты, может формироваться твёрдая клатратная фаза. Рост и накопление гидратных частиц создают сопротивление движению потока и оказывают влияние на стабильность технологического процесса.

Начальная стадия образования гидратов — нуклеация — связана с возникновением молекулярных ассоциаций, являющихся зародышами новой фазы. Однако вхождение системы в область термодинамической стабильности гидратов не означает немедленного начала кристаллизации. Для первоначального формирования ядра необходимо преодоление энергетического барьера и упорядоченное расположение молекул [1].

Цель статьи — проанализировать образование ядра гидрата в системе природный газ–вода с термодинамической и молекулярной точек зрения, а также выявить границы применимости существующих механизмов и раскрыть их технологическое значение.

Материалы и методы

В соответствии с поставленной целью образование ядра гидрата в системе природный газ–вода изучалось на основе методов систематического обобщения научной литературы, термодинамического анализа и сравнительной оценки молекулярных механизмов. В качестве источников для анализа были рассмотрены научные работы, посвящённые классической теории нуклеации, фазовым равновесиям гидратов, индукционному периоду и моделированию методом молекулярной динамики.

Термодинамический анализ предусматривал интерпретацию стабильности гидратной фазы и движущей силы нуклеации в зависимости от разности химических потенциалов, фугитивности газовых компонентов и активности воды. В рамках классической теории нуклеации анализировалось соотношение между уменьшением объёмной свободной энергии при образовании новой фазы и энергией, затрачиваемой на формирование межфазной поверхности. Теоретически рассмотрено влияние данного соотношения на критический размер ядра и энергетический барьер нуклеации. При сравнительном анализе молекулярных механизмов использовались результаты моделирования методом молекулярной динамики, представленные в научной литературе. Локальные флуктуации концентрации молекул газа, перестройка сети водородных связей воды, формирование каркасоподобных кластеров и переход аморфных промежуточных структур в кристаллическое состояние рассматривались как взаимосвязанные процессы. Механизмы сравнивались по структуре первоначальных кластеров, последовательности упорядочения молекул газа и воды, а также особенностям формирования критического ядра.

Результаты и обсуждение

Образование гидратов природного газа состоит из нескольких последовательных стадий, первой и определяющей из которых является образование ядра (нуклеация). Процесс нуклеации характеризуется формированием первоначального микроскопического кристаллического центра, приводящего к возникновению термодинамический стабильной гидратной фазы. Данный процесс начинается в природном газе, в присутствии свободной воды и на поверхности их контакта при условиях, когда давление и температура соответствуют области гидрат образования.

В газопроводах природного газа, сепараторах, теплообменниках и системах сбора газа в составе газа всегда присутствует определённое количество водяного пара. Если температура снижается ниже равновесной температуры гидрат образования, а давление

остаётся достаточно высоким, водяной пар конденсируется с образованием слоя свободной воды. Именно эта водная фаза является основной средой для формирования гидратных кристаллов.

Газовый гидрат представляет собой клатратное соединение, образующееся в результате включения молекул газа (CH_4, C_2H_6, C_3H_8, CO_2, H_2S и др.) в трёхмерную кристаллическую решётку, сформированную молекулами воды посредством водородных связей. При этом молекулы газа не образуют химических связей с водой, а лишь располагаются в полостях водяной решётки.

Поскольку основную долю углеводородов в составе природного газа составляет метан, гидраты преимущественно образуются в присутствии воды и метана. Вместе с тем гидраты также могут формироваться в газовой среде в присутствии содержащихся в ней малых молекул, в частности метана (CH_4), этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8), диоксида углерода (CO_2) и сероводорода (H_2S).

На молекулярном уровне молекулы воды взаимодействуют друг с другом посредством водородных связей и стремятся сформировать упорядоченную трёхмерную решётчатую структуру. Внутри такой решётки начинают формироваться внутренние полости — клатратные ячейки. На начальной стадии эти структуры имеют очень малые размеры и являются неустойчивыми, поэтому большинство из них распадается.

Малые молекулы, присутствующие в газовой среде, такие как метан (CH_4), этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), диоксид углерода (CO_2) и сероводород (H_2S), диффундируют в эти полости. Размещение молекул газа внутри ячеек не сопровождается образованием химических связей с молекулами воды, а осуществляется преимущественно под действием ван-дер-ваальсовых сил. Такое взаимодействие снижает свободную энергию водной решётки и переводит клатратные ячейки в термодинамическое более устойчивое состояние [1; 12].

Данная схема комплексно отражает физико-химическую сущность образования гидратов в процессе добычи, подготовки и транспортировки природного газа по магистральным трубопроводам, а также основные факторы, влияющие на данный процесс. Диаграмма охватывает все стадии — от образования гидратов на молекулярном уровне до формирования закупорки в трубопроводе.

В первой части схемы представлена клатратная структура газового гидрата. Клатратная решётка состоит из трёхмерной структуры, сформированной молекулами воды посредством водородных связей, во внутренних полостях которой располагаются CH_4, CO_2, H_2S и другие малые молекулы газа [2; 6; 9].

Вторая часть диаграммы показывает основные термодинамические условия, необходимые для образования гидратов.

При образовании гидратов основными факторами являются высокое давление, низкая температура, наличие свободной воды, присутствие гидрат образующих газов и достаточное время, необходимое для протекания процесса (индукционный период).

Повышение давления увеличивает вероятность проникновения молекул газа в водную решётку. Снижение температуры способствует упорядочению молекул воды и приводит к более устойчивому формированию клатратных каркасов.

Схема последовательно, в семь стадий, показывает протекание процессов гидрат образования на молекулярном уровне при подготовке природного газа к приёму и транспортировке. Данный процесс подчиняется термодинамическим и кинетическим закономерностям и охватывает стадии от формирования гидратного кристалла до полной закупорки трубопровода.

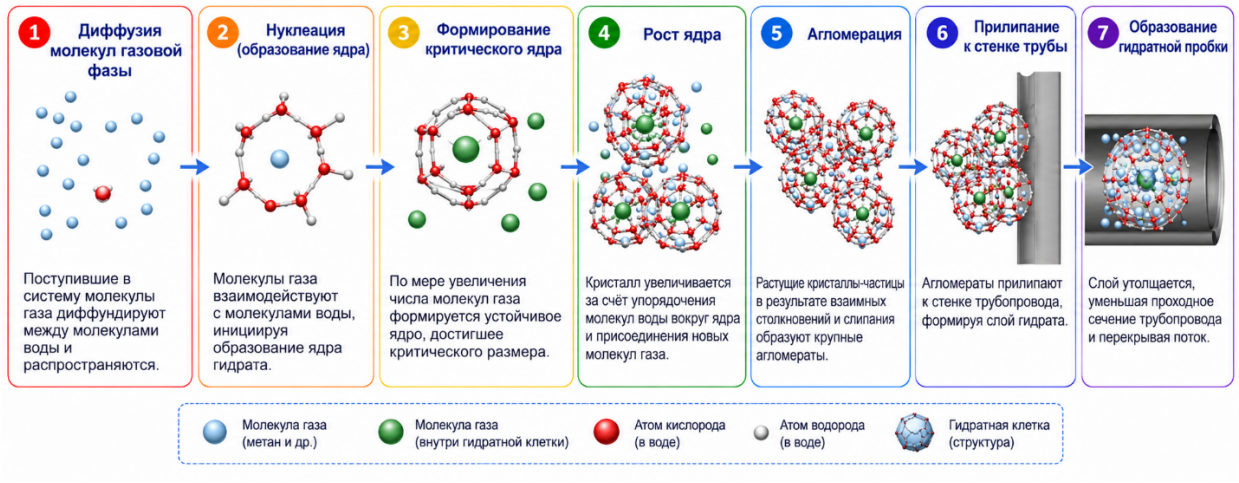


Рисунок1. Этапы механизма образования гидрата

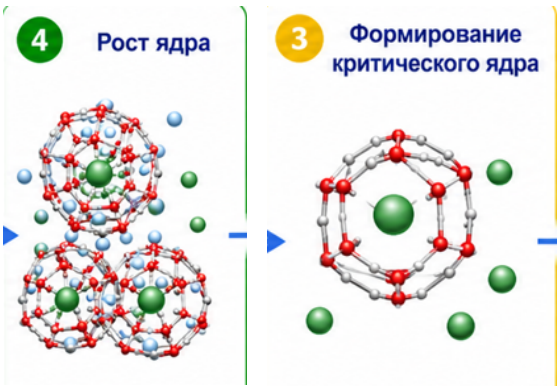
Из рисунка 1 видно, что образование гидратов представляет собой непрерывный и многостадийный процесс. Процесс начинается с конденсации водяного пара и образования свободной воды, после чего последовательно протекают нуклеация, формирование клатратных каркасов, проникновение молекул газа в полости, рост кристаллов, агломерация, прилипание к стенке трубопровода и, при неблагоприятных условиях, образование гидратной пробки. Образование гидратов в составе природного газа протекает в следующей последовательности [3; 10; 11]:



1-й этап. Конденсация водяного пара: Процесс начинается при приближении температуры потока природного газа к температуре образования гидратов или её понижении ниже данного значения. В этих условиях водяной пар, содержащийся в газе, конденсируется с образованием капель свободной воды. Именно свободная вода служит основной средой для образования гидратов. При полной осушке газа вероятность образования гидратов значительно снижается.

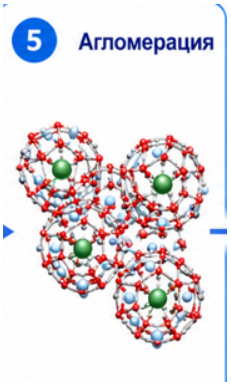


2-й этап. Нуклеация (образование ядра): Молекулы конденсированной воды начинают формировать упорядоченные трёхмерные структуры посредством водородных связей. Эти структуры представляют собой начальные ядра кристалла гидрата. В процессе нуклеации система должна преодолеть барьер свободной энергии Гиббса. Если образовавшееся ядро имеет размер меньше критического радиуса, оно остаётся нестабильным и распадается. Ядро, размер которого превышает критический радиус, стабилизируется и переходит к следующей стадии роста.

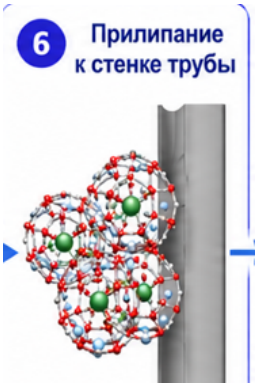


3-й этап. Проникновение молекул газа в клатратные каркасы: После образования ядра молекулы воды посредством водородных связей формируют полиэдрические клатратные каркасы. Молекулы газа (CH_4, CO_2, H_2S и др.) диффундируют во внутренние полости этих каркасов и занимают их. Они не образуют химических связей с молекулами воды, а удерживаются внутри полостей преимущественно за счёт ван-дер-ваальсовых взаимодействий. Проникновение молекулы газа в полость клатрата повышает термодинамическую стабильность клатратной структуры и создаёт необходимые условия для дальнейшего роста кристалла.

4-й этап. Рост кристалла: После формирования устойчивого ядра к его поверхности непрерывно присоединяются новые молекулы воды и газа. В результате объём гидратного кристалла увеличивается. Скорость роста кристалла зависит от температуры, давления, состава газа, содержания воды и интенсивности массообменная. При наличии CO_2 и H_2S в составе газа рост кристаллов, как правило, протекает быстрее.



5-й этап. Агломерация: Образовавшиеся отдельные кристаллы гидрата сталкиваются друг с другом, слипаются и формируют крупные агрегаты — агломераты. Данный процесс происходит под воздействием влаги на поверхности кристаллов, ван-дер-ваальсовых сил и механических воздействий. Агломерация считается одним из наиболее опасных этапов возникновения гидратных проблем в трубопроводах.



6-й этап. Прилипание к стенке трубопровода: Образовавшиеся агломераты осаждаются и прикрепляются к стенке трубопровода. Особенно интенсивно гидратные частицы закрепляются на участках с пониженной температурой стенки, формируя тонкий слой гидрата. В дальнейшем этот слой утолщается и уменьшает внутренний диаметр трубопровода. В результате возрастает гидравлическое сопротивление и увеличиваются потери давления.

7-й этап. Образование гидратной пробки: На заключительной стадии процесса гидратный слой постепенно утолщается и частично или полностью перекрывает поперечное сечение трубопровода. Такое состояние называется образованием гидратной пробки. Гидратная пробка может привести к резкому снижению или полной остановке потока газа, увеличению нагрузки на компрессоры, опасному повышению давления и возникновению аварийных ситуаций.

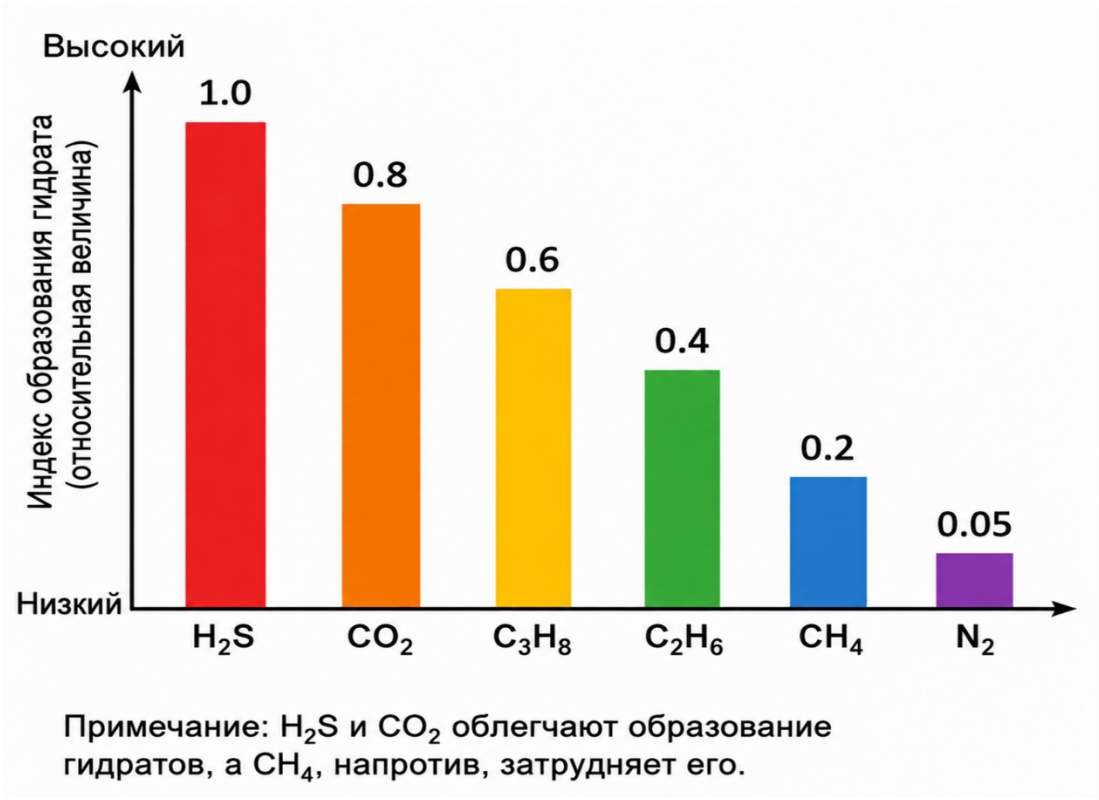


Рисунок 2. Зависимость образования гидратов от состава природного газа

Рассмотрим процесс образования гидратов на примере метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2). Поскольку основную долю углеводородов в составе природного газа составляет метан, гидраты преимущественно образуются в присутствии воды и метана. Гидраты других углеводородов представляют собой кристаллические структуры, формирующиеся при низких температурах и высоких давлениях в результате взаимодействия молекул воды с молекулами соответствующих газовых компонентов. Процесс образования гидратов с участием различных газовых компонентов протекает в несколько последовательных стадий [8; 13].

1-й этап. Совместное присутствие молекул метана и воды. Процесс начинается при контакте молекул метана (CH_4), содержащихся в природном газе, со свободной водой. Если давление превышает давление образования гидратов, а температура соответствует области гидратной стабильности, создаются благоприятные термодинамические условия для гидрата образования.

На данном этапе молекулы воды находятся в обычном жидком состоянии, в то время как молекулы метана частично растворяются в воде и формируют вокруг себя гидрофобную гидратационную оболочку (рис. 3.1, этап 1).

2-й этап. Кластеризация молекул воды. При понижении температуры водородные связи между молекулами воды становятся более устойчивыми, и они начинают формировать небольшие упорядоченные группы — кластеры.

Эти кластеры ещё не являются полностью сформированными кристаллами, однако представляют собой начальные зародыши будущей гидратной решётки. Они постоянно образуются и распадаются (рис. 3.1, этап 2).

3-й этап. Формирование клатратного каркаса. По мере увеличения количества кластеров молекулы воды начинают объединяться посредством водородных связей в трёхмерные полиэдрические структуры. В результате формируются клатратные каркасы с внутренними полостями.

Эти каркасы состоят из молекул воды, а их устойчивость обеспечивается водородными связями. На момент формирования каркаса в его центре ещё может отсутствовать молекула газа (рис. 3.1, этап 3).

4-й этап. Проникновение молекул метана внутрь каркаса. Молекула метана посредством диффузии проникает в образовавшуюся полость и занимает её. Молекула метана не образует химической связи с водой. Стабильность решётки обеспечивается главным образом ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями и водородными связями между молекулами воды. Молекула метана может свободно перемещаться внутри полости, но при этом не покидает её (рис. 3.1, этап 4).

5-й этап. Формирование устойчивого гидратного кристалла. После заполнения клатратных полостей молекулами метана формируется устойчивый гидратный кристалл.

Общая стехиометрическая формула метанового гидрата: $CH_4 \cdot 5{,}75H_2O$

Это означает, что на одну молекулу метана в среднем приходится 5,75 молекулы воды. Данная структура является наиболее распространённой кристаллической структурой гидратов природного газа (рис. 3.1, этап 5) [4].

6-й этап. Рост кристаллов и агломерация. После образования первого ядра гидрата к его поверхности начинают присоединяться новые молекулы воды и метана. В результате формируется несколько последовательных слоёв, гидрат кристаллизуется и постепенно увеличивается в размерах (рис. 3.1, этап 6).

В дальнейшем несколько гидратных кристаллов объединяются между собой с образованием агломератов. Крупные агломераты могут частично или полностью перекрывать поперечное сечение трубопровода. Поэтому образование гидратов в газопроводах и технологическом оборудовании является одной из основных причин возникновения аварийных ситуаций.

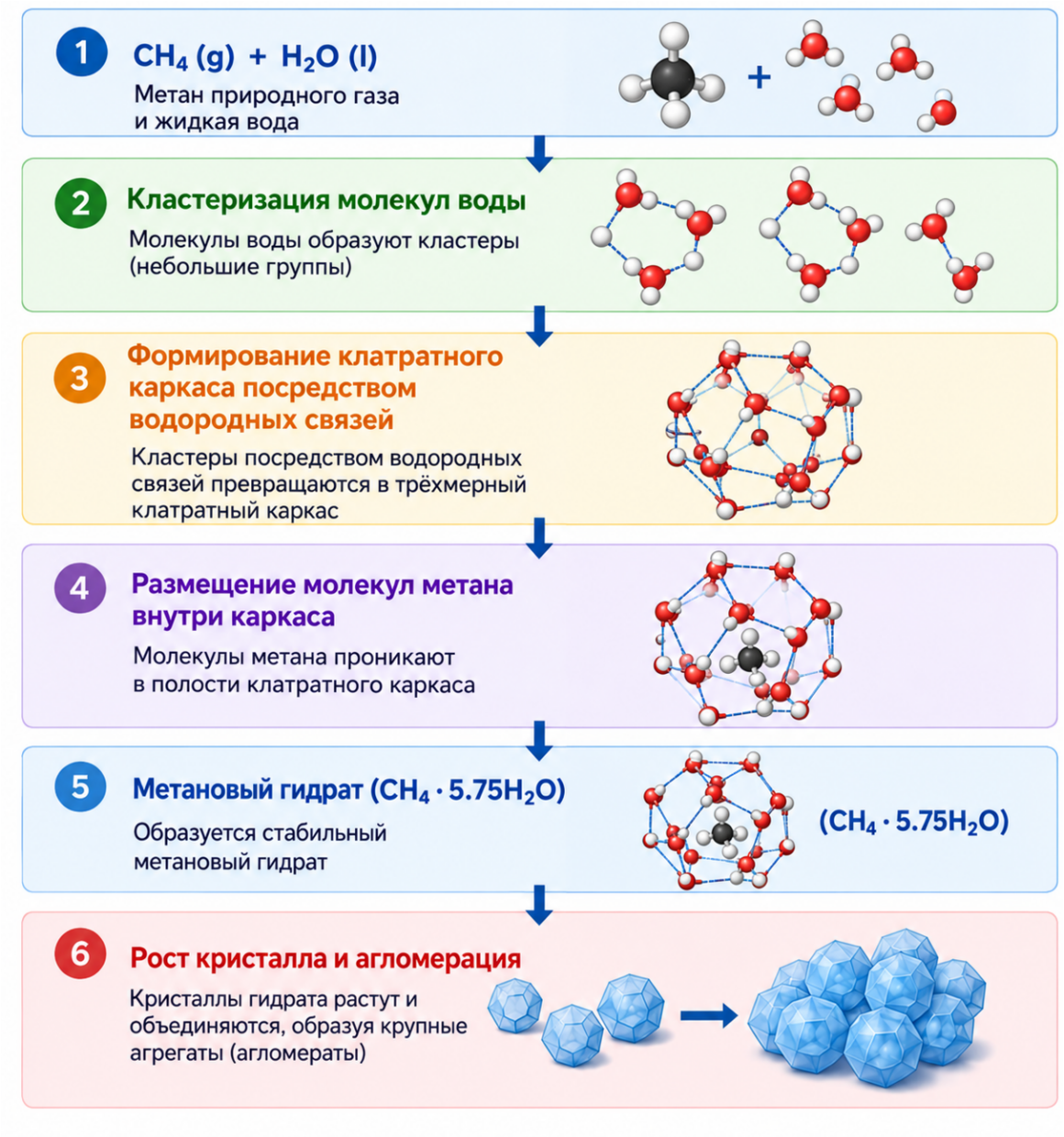


Рисунок 3. Механизм образования метанового гидрата

Образование метановых гидратов протекает в результате совместного воздействия термодинамических и кинетических факторов. Процесс включает такие стадии, как кластеризация молекул воды, формирование клатратных каркасов посредством водородных связей, проникновение молекул метана в данные каркасы и рост устойчивых кристаллических структур. Образовавшиеся гидратные кристаллы в дальнейшем агломерируются, превращаясь в крупные структуры, и при добыче, сборе и транспортировке природного газа по магистральным трубопроводам увеличивают сопротивление потоку, повышают потери давления и отрицательно влияют на надёжность технологической системы. Поэтому глубокое изучение механизма образования гидратов и разработка методов их предупреждения и устранения являются одной из основных научных задач.

Таким образом, несколько ячеек, заполненных молекулами газа, объединяются и образуют критическое ядро. Если радиус ядра меньше критического значения, оно распадается вследствие высокой поверхностной свободной энергии. Если же размер ядра превышает критическое значение, гидратный кристалл самопроизвольно продолжает расти. Данный процесс объясняется классической теорией нуклеации.

На скорость нуклеации влияет ряд факторов:

повышение давления повышает стабильность гидратной фазы и увеличивает вероятность образования ядер, снижая энергетический барьер критической нуклеации;

понижение температуры облегчает упорядочение молекул воды и ускоряет формирование гидратной решётки;

увеличение количества свободной воды увеличивает площадь поверхности контакта, на которой могут образовываться ядра гидрата;

тяжёлые углеводороды (C_2^+–C_5^+) также расширяют область гидратообразования.

Наличие H_2S и CO_2 в составе природного газа способствует более лёгкому образованию гидратов по сравнению с метаном, поскольку данные газы сильнее стабилизируют клатратную решётку. По сравнению с гидратами, образованными метаном и другими углеводородами, гидраты, образованные сероводородом и диоксидом углерода (CO_2), представляют значительно большую опасность для технологического оборудования. Гидраты метана и углеводородов кристаллизуются и накапливаются в газопроводах, что может привести к их частичной или полной закупорке.

Сероводород и диоксид углерода (CO_2) взаимодействуют с водой с образованием кислот. В образующихся гидратах также может проявляться кислая среда. Поэтому образовавшиеся гидраты, помимо кристаллизации и закупорки трубопроводов, могут способствовать их коррозии.

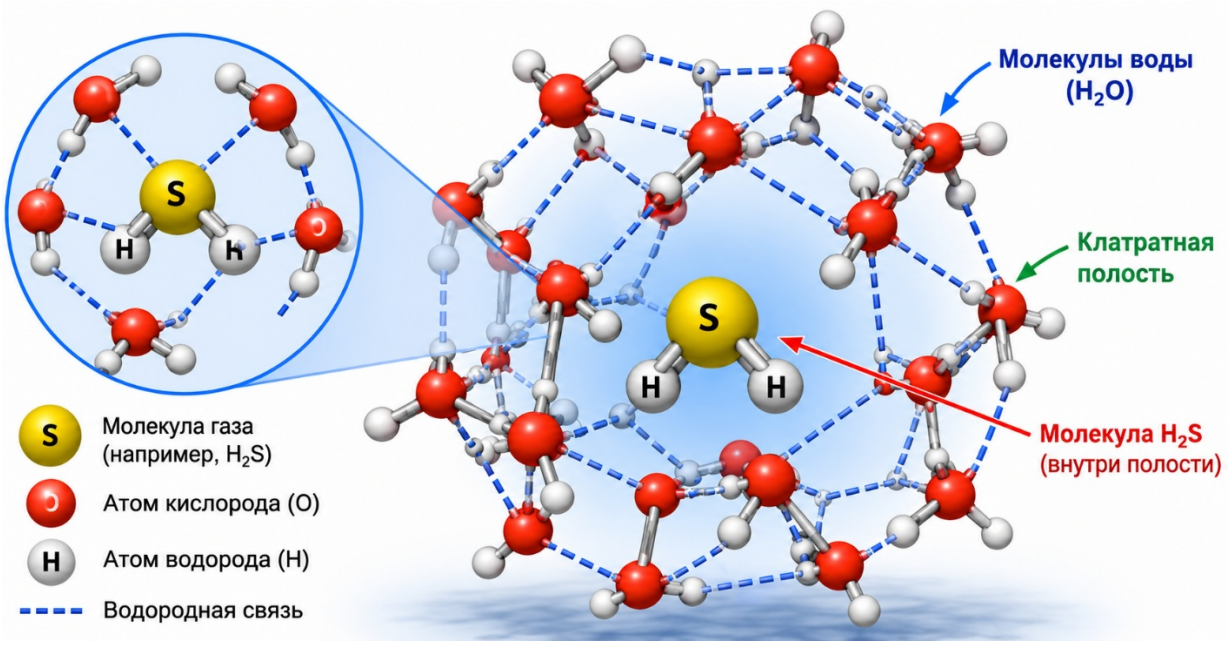


Рисунок 4. Механизм образования гидрата сероводорода (H_2S)

O — кислород (атом воды), **H** — водород (атом воды), **S** — сера, ⋯ — водородные связи. С термодинамической точки зрения нуклеация происходит только в том случае, если свободная энергия Гиббса гидратной фазы становится ниже свободной энергии газовой и водной фаз [7; 5]:

$\Delta G=\Delta Gs+\Delta Gv$

ΔGs— положительная поверхностная свободная энергия, затрачиваемая на формирование поверхности ядра;

ΔGv— объёмная свободная энергия, уменьшающаяся в результате образования новой гидратной фазы.

Ядро гидрата переходит в устойчивое состояние только после преодоления максимума общей свободной энергии, после чего начинается рост кристалла.

В трубопроводах природного газа данный процесс обычно протекает на поверхности стенок труб, клапанов, арматуры, частиц ржавчины или механических примесей. Эти участки служат центрами гетерогенной нуклеации и могут многократно ускорять процесс образования гидратов. Поэтому в промышленной практике предотвращение стадии нуклеации осуществляется посредством осушки газа, применения теплообменников в технологической системе для поддержания температуры выше границы гидрат образования, а также использования таких ингибиторов, как метанол и моноэтиленгликоль (МЭГ).

Заключение

На основании результатов исследования установлено, что образование гидратов в среде природного газа представляет собой многостадийный физико-химический процесс, протекающий под совместным воздействием термодинамических и кинетических факторов. Начальной и определяющей стадией гидрат образования является нуклеация. Установлено, что в результате кластеризации молекул воды, формирования клатратных ячеек и проникновения молекул газа в эти ячейки образуется устойчивое ядро гидрата.

Основными факторами, влияющими на процесс гидрат образования, являются снижение температуры, повышение давления и наличие достаточного количества свободной воды в составе природного газа. CH_4, CO_2 и H_2S, содержащиеся в природном газе, являются основными гидрат образующими компонентами. Установлено, что гидрат, образующийся при взаимодействии воды с H_2S, характеризуется высокой стабильностью и коррозионной активностью и представляет наибольшую опасность для технологического оборудования. Рост и агломерация образовавшихся гидратных кристаллов приводят к уменьшению проходного сечения трубопровода, увеличению гидравлического сопротивления и потерь давления, а также к возникновению нарушений в работе технологической системы, что приводит к снижению её производительности.

Кроме того, установлено, что стенки трубопроводов, арматура и механические примеси могут выступать в качестве центров гетерогенной нуклеации, ускоряя процесс образования гидратов. Поэтому эффективная дегидратация природного газа, поддержание его температуры выше границы гидрат образования и, при необходимости, применение гидратных ингибиторов являются основными технологическими мерами предотвращения

гидрат образования. Полученные результаты служат научной основой для совершенствования процессов подготовки природного газа и обеспечения его надёжной транспортировки по магистральным трубопроводам.

Список литературы

1. Запорожец Е.П., Шостак Н.А. Факторы, влияющие на скорость роста газовых кристаллогидратов // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 1. – С. 49–56.
2. Истомин В.А., Квон В.Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. – М.: ИРЦ Газпром, 2004. – 509 с.
3. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
4. Қодиров Н.Т., Узоқов А.А., Утемуратов А.Б.М., Тўраев Т.Б. Табиий газни сепараторда тозалаш жараёнининг гидродинамик кўрсатгичларини оптималлаштириш // Development of Science. – 2026. – Т. 4.
5. Нестеров А.Н. Кинетика и механизм гидратообразования газов в присутствии поверхностно-активных веществ: дис. … д-ра хим. наук. – Тюмень, 2006. – 280 с.
6. Хайруллин М.Х., Шамсиев М.Н., Тулупов Л.А. Моделирование гидратообразования в газопроводах // Нефтегазовое дело. – 2005. – № 1. – 3 с. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Hairullin/Hairullin_1.pdf (дата обращения: 22.09.2026).
7. Arjun A., Bolhuis P.G. Homogeneous nucleation of crystalline methane hydrate in molecular dynamics transition paths sampled under realistic conditions // The Journal of Chemical Physics. – 2023. – Т. 158. – Art. 044504. – DOI: 10.1063/5.0124852.
8. Guo G.-J., Zhang Z. Open questions on methane hydrate nucleation // Communications Chemistry. – 2021. – Т. 4. – Art. 102. – DOI: 10.1038/s42004-021-00539-6.
9. Ke W., Svartaas T.M., Chen D. A review of gas hydrate nucleation theories and growth models // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – Т. 61. – P. 169–196. – DOI: 10.1016/j.jngse.2018.10.021.
10. Li Z., Yu W., Ding L. Unraveling the Microscopic Influence Mechanism of H_2S on Methane Hydrate Formation via Molecular Simulation Techniques // Langmuir. – 2026. – Т. 42. – P. 860–872. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.5c04991.
11. Salamat Y., Moghadassi A., Illbeigi M., Eslamimanesh A., Mohammadi A.H. Experimental study of hydrogen sulfide hydrate formation: Induction time in the presence and absence of kinetic inhibitor // Journal of Energy Chemistry. – 2013. – Т. 22. – P. 114–118. – DOI: 10.1016/S2095-4956(13)60015-7.
12. Uzoqov A.A. To‘rayev T.B., Raximov H.N. Tabiiy gazni gazkondensatidan va mexanik qo‘shimchalardan tozalash samaradorligini oshirish // Kompozitsion materiallar ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnal. – 2025. – № 2.
13. Ward Z.T., Deering C.E., Marriott R.A., Sum A.K., Sloan E.D., Koh C.A. Phase Equilibrium Data and Model Comparisons for H_2S Hydrates // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2015. – Т. 60. – P. 403–408. – DOI: 10.1021/je500657f.

References

1. Zaporozhets E.P., Shostak N.A. Faktory, vliyayushchie na skorost rosta gazovykh kristallogidratov [Factors influencing the growth rate of gas clathrate hydrates] // Neftepromyslovoe delo. – 2015. – No. 1. – P. 49–56. (In Russ.).
2. Salamat Y., Moghadassi A., Illbeigi M., Eslamimanesh A., Mohammadi A.H. Experimental study of hydrogen sulfide hydrate formation: Induction time in the presence and absence of kinetic inhibitor // Journal of Energy Chemistry. – 2013. – Vol. 22, No. 1. – P. 114–118. – DOI: 10.1016/S2095-4956(13)60015-7.
3. Guo G.-J., Zhang Z. Open questions on methane hydrate nucleation // Communications Chemistry. – 2021. – Vol. 4. – Art. 102. – DOI: 10.1038/s42004-021-00539-6.
4. Nesterov A.N. Kinetika i mekhanizm gidratoobrazovaniya gazov v prisutstvii poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Kinetics and mechanism of gas hydrate formation in the presence of surfactants]: dis. … dokt. khim. nauk. – Tyumen, 2006. – 280 P. (In Russ.).
5. Khairullin M.Kh., Shamsiev M.N., Tulupov L.A. Modelirovanie gidratoobrazovaniya v gazoprovodakh [Modeling of hydrate formation in gas pipelines] // Neftegazovoe delo. – 2005. – No. 1 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Hairullin/Hairullin_1.pdf (accessed: 22.09.2026). (In Russ.).
6. Arjun A., Bolhuis P.G. Homogeneous nucleation of crystalline methane hydrate in molecular dynamics transition paths sampled under realistic conditions // The Journal of Chemical Physics. – 2023. – Vol. 158, No. 4. – Art. 044504. – DOI: 10.1063/5.0124852.
7. Ke W., Svartaas T.M., Chen D. A review of gas hydrate nucleation theories and growth models // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – Vol. 61. – P. 169–196. – DOI: 10.1016/j.jngse.2018.10.021.
8. Istomin V.A., Yakushev V.S. Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh [Gas hydrates under natural conditions]. – Moscow: Nedra, 1992. – 236 P. (In Russ.).
9. Istomin V.A., Kvon V.G. Preduprezhdenie i likvidatsiya gazovykh gidratov v sistemakh dobychi gaza [Prevention and elimination of gas hydrates in gas production systems]. – Moscow: IRC Gazprom, 2004. – 509 P. (In Russ.).
10. Li Z., Yu W., Ding L. Unraveling the Microscopic Influence Mechanism of H_2S on Methane Hydrate Formation via Molecular Simulation Techniques // Langmuir. – 2026. – Vol. 42, No. 1. – P. 860–872. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.5c04991.
11. Ward Z.T., Deering C.E., Marriott R.A., Sum A.K., Sloan E.D., Koh C.A. Phase Equilibrium Data and Model Comparisons for H_2S Hydrates // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2015. – Vol. 60, No. 2. – P. 403–408. – DOI: 10.1021/je500657f.
12. Uzoqov A.A. To‘rayev T.B., Raximov H.N. Tabiiy gazni gazkondensatidan va mexanik qo‘shimchalardan tozalash samaradorligini oshirish // Kompozitsion materiallar ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnal. – 2025. – No. 2. – P. 113–119.

13. Qodirov N.T., Uzoqov A.A., Utemuratov A.B.M. To‘raev T.B. Tabiiy gazni separatorda tozalash jarayonining gidrodinamik ko‘rsatgichlarini optimallashtirish [Optimization of hydrodynamic parameters of the natural gas purification process in a separator] // Development of Science. – 2026. – Vol. 4, No. 3. – P. 174–184.