

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАКУПОРКИ ГИДРАТАМИ  
ПРИРОДНОГО ГАЗАСяо Чжэньсинь<sup>1</sup>, Гульков А.Н.<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8  
E-mail: <sup>1</sup>syao.ch@dvfu.ru

**Аннотация.** Закупорка природными газогидратами является основной угрозой безопасности при эксплуатации трубопроводов, и наносимый ими ущерб является значительным. Скопление и отложение его кристаллов уменьшит поперечное сечение трубопровода, увеличит сопротивление потоку и снизит эффективность транспортировки газа. В тяжелых случаях трубопровод будет полностью забит, что приведет к остановке добычи газа на месторождении. В то же время это может привести к разрыву трубопровода, утечке природного газа и несчастным случаям, связанным со взрывами и возгораниями. Кроме того, разблокировать работу очень сложно и дорого. Это также приведет к сокращению срока службы трубопровода и ограничению безопасной и стабильной разработки газовых месторождений.

**Предмет исследования:** Целью является предотвращение закупорки гидратами природного газа газопроводов и обеспечение безопасной и стабильной транспортировки. В первую очередь, выясняются механизм образования и факторы, влияющие на образование гидратов. Систематический анализ этих механизмов и факторов показал, что десульфурация является эффективным средством предотвращения закупорки гидратами. В случаях, когда закупорка известна, для удаления гидратных пробок из трубопровода применяется стандартная процедура.

**Материалы и методы:** Объедините технологию десульфурации с существующей стандартной технологией очистки труб, чтобы решить проблему засорения гидратом трубопроводов природного газа.

**Результаты:** Предотвращение и борьба с засорением гидратом трубопроводов природного газа должны основываться на профилактике и дополняться технологией очистки труб. Технология предварительной сероочистки является одним из основных профилактических методов, который может снизить вероятность образования засоров из-за соединения сероводорода и природного газа, а также снизить риск образования гидратов и закупорки источника. Для образовавшегося засора можно регулировать рабочие условия, такие как температура и давление, таким образом, чтобы разрушить стабильную структуру гидрата, быстро разложить и устранить засор, а также обеспечить бесперебойную работу трубопровода.

**Выводы:** Для эффективного предотвращения и контроля засорения трубопроводов природного газа гидратами. Рекомендуется уделять приоритетное внимание этапам предварительной обработки и обессеривания, оптимизировать параметры процесса для повышения эффективности удаления примесей, выбирать оборудование с высокой степенью адаптации, регулярно контролировать содержание примесей в трубопроводном природном газе и устранять условия гидратообразования из источника. В связи с возникшей закупоркой необходимо разработать стандартизированный процесс аварийного реагирования, уточнить разумный диапазон регулирования температуры и давления, а также оснастить трубопровод профессиональным оборудованием быстрого реагирования, чтобы обеспечить эффективное устранение закупорки без повреждения трубопровода. В то же время был создан механизм мониторинга для нормализации работы трубопровода, позволяющий отслеживать ключевые данные, такие как давление и температура, в режиме реального времени, заранее прогнозировать риск закупорки и сочетать регулярное техническое обслуживание и капитальный ремонт для обеспечения непрерывной бесперебойной работы трубопровода.

**Ключевые слова:** Природный газ; гидрат; технология обессеривания

## 1 Механизм образования гидрата природного газа

Процесс кристаллизации гидратов природного газа обычно можно разделить на две стадии: зарождение и рост кристаллов. Анализируемый с точки зрения динамики механизм образования можно разделить на три последовательных этапа: сначала формируется прототип ядра с критическим радиусом; затем ядро постепенно развивается и расширяется; и, наконец, составляющие вещества мигрируют к поверхности ядра через границу раздела твердое тело-жидкость. Под непрерывным действием силы Ван-дер-Ваальса взаимодействие между молекулами газа и соседними молекулами воды может постепенно усиливаться, вызывая непрерывное расширение объема ядра.[1] Когда различные ядра сталкиваются в системе, сила

межмолекулярной адсорбции заставляет их соединяться друг с другом, образуя составное ядро. Этот процесс агломерации и роста продолжается и, в конце концов, приводит к образованию твердой структуры гидрата природного газа.

## 2 Предварительная обработка природного газа для обессеривания

### 2.1 Анализ опасности сульфидов в природном газе

Основные опасности, связанные с сульфидами, такими как сероводород, при транспортировке по трубопроводам, проявляются как в засорении гидратами, так и в коррозии трубопроводов: с одной стороны, при одинаковых температурных условиях с увеличением объемной доли сероводорода

критическое давление для образования гидратов природного газа уменьшается, а диапазон образования гидратов увеличивается. условия становятся более суровыми, что указывает на то, что сероводород способствует образованию гидратов природного газа и увеличивает риск аварий из-за засорения гидратов природного газа; [1] С другой стороны, он вызывает серьезную коррозию трубопроводов оборудования и различного сопутствующего оборудования, особенно в условиях высокой температуры и высокого давления, что приводит к это еще больше сократит срок службы оборудования.

## 2.2 Классификация технологий обессеривания

Для предотвращения и контроля препятствий при транспортировке, потерь оборудования и рисков для безопасности, вызванных закупоркой природного газа гидратами во время транспортировки природного газа, обработка природного газа сероочисткой стала одним из ключевых методов профилактики и контроля. По техническому принципу его можно разделить на три категории: метод сухой десульфурации, метод влажной десульфурации и метод десульфурации с мембранным разделением.

(1) Процесс сухой обессеривания: Суть процесса сухой обессеривания заключается в удалении сероводорода посредством физической или химической адсорбции твердыми адсорбентами. Обычно используемые адсорбенты включают оксид железа, оксид цинка и т.д. Если взять в качестве примера способ десульфурации оксида железа, то сероводород в природном газе вступает в химическую реакцию с оксидом железа с образованием сульфида железа и воды, тем самым достигая десульфурации.[1]

(2) Процесс мокрой десульфурации: В процессе мокрой десульфурации используется химическая реакция между жидким поглотителем и сероводородом для достижения разделения. Обычно используемыми поглотителями являются растворы аминов (таких как MEA, DEA), щелочь и т.д. В качестве примера можно привести процесс десульфурации раствора спиртоamina, при котором спиртоамин вступает в реакцию с сероводородом в природном газе с образованием соответствующих сульфидов и протонированных спиртоаминов, и абсорбент может быть регенерирован и переработан путем нагревания, анализа и т.д., что значительно снижает эксплуатационные расходы.[1]

(3) Процесс мембранного разделения и десульфурации: Метод мембранного разделения и

десульфурации основан на селективной проницаемости специальных полимерных мембран и использует разницу в скорости проникновения различных молекул газа в мембрану для достижения разделения.[1] Из-за различных коэффициентов растворимости и диффузии основных компонентов природного газа, таких как сероводород и метан, молекулы сероводорода могут предпочтительно проходить через мембранный материал, в то время как активные компоненты, такие как метан, задерживаются для достижения цели обессеривания.

## 2.3 Анализ и сравнение технологии обессеривания

Сероочистка природного газа в основном включает в себя три основных процесса: сухое, мокрое и мембранное разделение, каждый из которых имеет свои собственные сценарии адаптации и характеристики. Метод десульфурации оксида железа, обычно используемый в процессе сухой десульфурации, обладает высокой практичностью благодаря преимуществам короткого процесса и простой конструкции оборудования, но необходимо регулярно заменять десульфураторное средство, а стоимость обработки отработанного десульфуратора высока. Он подходит для условий работы с концентрацией сероводорода  $\leq 2,4$  мг./л. Спирто-аминный метод мокрой десульфурации обладает высокой технологической зрелостью и является широко используемым решением в промышленности. Однако конфигурация оборудования для этого метода сложна, а первоначальные инвестиции и последующие эксплуатационные расходы выше. Он больше подходит для крупномасштабных проектов по десульфурации природного газа, особенно для сценариев где содержание скрытой серы превышает 10 т/сут.[1] Основным преимуществом процесса мембранного разделения и десульфурации является то, что структура мембраны чрезвычайно избирательна по отношению к сероводороду. Однако процесс производства мембранной системы сложен, стоимость приобретения высока, а потери энергии при эксплуатации велики, что значительно затрудняет практическое применение этого метода. ограниченный, и он еще не получил широкой популяризации. Эти три типа процессов имеют свои преимущества и недостатки, и фактический выбор необходимо учитывать в сочетании с концентрацией сероводорода в природном газе, масштабами очистки, бюджетными затратами и другими факторами.

**Таблица 1.** Таблица анализа технологии десульфурации  
**Table 1.** Desulfurization Technology Analysis Table

Категория	Способ обессеривания	Преимущества	Недостатки	Сфера применения
Способ сухого обессеривания	Способ десульфуризации оксида железа	Кратковременный процесс, простота оборудования	Требуется регулярная замена десульфуризирующего агента; высокие затраты на утилизацию отработанного десульфуризирующего агента.	$\rho (H_2S) \leq 2.4 \text{ mg/L}$ [1]
Процесс мокрой десульфуризации	Спиртоаминный способ	Относительно отработанная технология	Сложность оборудования, что приводит к высоким инвестиционным и эксплуатационным расходам.	Крупномасштабная десульфуризация природного газа; потенциальное содержание серы более 10 т/д
Процесс мембранного разделения и обессеривания	Способ мембранного разделения	Структура мембраны обеспечивает максимальную селективность к сероводороду	Мембранные системы сложны в производстве, дороги и имеют значительные потери энергии	Практические применения ограничены

### 3 Способ устранения засорения гидратом природного газа

Основными методами устранения гидратного засорения трубопроводов природного газа являются метод нагрева и понижающий метод. Эти две компании реализуют решение проблемы перегруженности на основе различных принципов, каждый из которых имеет свои собственные технические характеристики и требования к применению.

Во-первых, основная логика метода нагрева заключается в нагревании закупорки таким образом, чтобы ее температура превышала температуру фазового равновесия водного соединения в рабочем состоянии, что приводит к разложению закупорки. Способ включает в себя такие виды нагрева обсадной колонны, как электромагнитный нагрев и высокотемпературный газовый нагрев. Среди них нагрев обсадной колонны достигается за счет противоточного теплообмена холодных и горячих жидкостей во внутренней и внешней трубах, при этом температура жидкости контролируется, а безопасность является высокой; [1] Метод электромагнитного нагрева подразделяется на ленточный метод электронагрева, метод прямого электронагрева и метод микроволнового нагрева. При применении необходимо заранее уточнить местоположение и длину засора, а диапазон нагрева должен полностью охватывать участок засора.

Во-вторых, метод снижения давления заключается в снижении давления в системе до уровня ниже равновесного давления гидратной фазы для достижения разблокировки. Это наиболее широко используемый и эффективный метод разблокировки гидратов в подводных трубопроводах. Он делится на два типа: одностороннее снижение давления и двустороннее одновременное снижение давления. Одностороннее снижение давления относительно просто в эксплуатации, но легко привести к тому, что блокирующий блок соприкоснется с трубопроводом с низким давлением, что представляет угрозу безопасности. Двустороннее одновременное снижение давления позволяет поддерживать баланс давления по обе стороны блокирующего блока, что не только безопаснее, но и быстрее при разблокировке. [1] Поскольку давление на глубоководной стороне подводного трубопровода трудно контролировать, на практике часто необходимо реализовать одностороннее снижение давления на стороне платформы. Кроме того, скорость снижения давления должна разумно контролироваться во время процесса разблокировки, чтобы обеспечить равномерное давление в трубопроводе и избежать дополнительных рисков, вызванных колебаниями давления.

**Таблица 2.** Таблица анализа технологии очистки трубопроводов  
**Table 2.** Pipeline cleaning technology analysis table

	Способ нагрева	Понижающий метод
Основной принцип	В месте нагрева закупорки температура выше равновесной температуры гидратной фазы при данных рабочих условиях, что приводит к ее разложению и разблокированию.	Уменьшите давление в системе до уровня ниже равновесного давления гидратной фазы, тем самым разлагая гидрат
Основные типы	Лучевой нагрев корпуса, электромагнитный нагрев, высокотемпературный газовый нагрев	Односторонний подъем, двусторонний одновременный подъем
Статус заявки	Широко используется ленточный метод электрообогрева, но он требует большого энергопотребления, а метод прямого электрообогрева является более спорным из-за проблемы электрической коррозии.	Наиболее часто используемый метод устранения засоров в подводных трубопроводах, с продуманным применением и превосходным эффектом

**ВЫВОДЫ**

Закупорка гидратами природного газа является серьезной скрытой опасностью при транспортировке природного газа, которая серьезно повлияет на безопасность и эффективность эксплуатации трубопроводов, поэтому необходимы научные методы профилактики и контроля. В этой статье рассматриваются основные идеи предотвращения и реагирования на чрезвычайные ситуации, а также предлагаются целенаправленные решения: во-первых, предварительная обработка и обессеривание являются основными средствами предотвращения. Поскольку сероводород может легко соединиться с природным газом, образуя засоры, примеси могут быть удалены с помощью процесса предварительной обессеривания, что может уменьшить количество материала. основа образования гидрата из источника и значительно снижает риск закупорки; во-вторых, для устранения возникшей закупорки используются традиционные методы обработки, проверенные практикой, которые разрушают стабильную структуру гидрата путем регулирования параметров температуры, давления и других условий работы и реализуют быстрое разложение и устранение засоров, а также своевременное беспрепятственное восстановление трубопровода. Комбинированный план предварительной обработки источника и экстренного реагирования на чрезвычайные ситуации не только предотвращает образование засоров в источнике, но и эффективно реагирует на чрезвычайные ситуации, обеспечивая надежную поддержку стабильной и безопасной транспортировки природного газа по трубопроводам.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Wang Sublime. Research and application of natural gas desulfurization technology in the third Oil Production Plant of Zhongyuan Oilfield [J]. Sichuan Chemical Industry, 2021, 24(01):39-42.
2. Liu Ke, Wang Xianglin, Yuan Qinghong, etc. Highly acidic natural gas desulfurization and decarbonization process technology, Technical research [J]. Petroleum and natural gas chemical industry, 2020, 49 (3) : 14-20.
3. Xiong Gang, Hu Yong, Fu Jingqiang, etc. New progress in high-sulfur natural gas purification technology and Development direction [J]. Natural gas industry, 2023, 43 (9) : 34-48.
4. Huang Chao, Dai Yiyang, on behalf of Changchun. Dynamic simulation and energy consumption analysis of natural gas desulfurization process [J]. Natural Gas and Petroleum, 2022, 40(1): 35-43
5. Wang Shihui, Jiang Wei, Huang Kun, etc. Research on multi-objective predictive modeling of natural gas desulfurization process based on deep learning [J]. Petroleum and natural gas chemical industry, 2025, 54 (4) : 1-11.
6. Fan Qinchu, Ruan Yujiao, Zhou Jun. The operating status and prospects of domestic natural gas purification plants under the carbon neutrality target of Carbon peak [J]. Petroleum and natural gas chemical industry, 2023, 52 (1) : 25-31.
7. Gao Libing, Lu Zhongyuan, Suo Hansheng, etc. Status quo of petrochemical process simulation software and development trends [J]. Chemical Progress, 2021, 40:1-14.
8. Huang Ting, Li Changjun, Ding Lin, etc. Dynamics of methane hydrate generation and decomposition in gas-water system [J]. Chemical progress, 2020, 39(8):2954-2961.
9. Gong Jing, Shi Bohui, Chen Yuchuan, etc. Subsea multiphase pipeline transportation containing natural gas hydrates and its clogging risk control [J]. Natural gas industry, 2020, 40(12):133-142.

## RESEARCH ON TECHNOLOGY TO PREVENT NATURAL GAS HYDRATE BLOCKAGE

Xiao Zhenxin<sup>1</sup>, Gulkov A.N.<sup>2</sup>

Far Eastern Federal University,  
Vladivostok, 690922, Sukhanova St., 8  
E-mail:<sup>1</sup>syao.ch@dvfu.ru

**Abstract.** Natural gas hydrate blockage is a core safety hazard in pipeline operation, posing significant risks. Its crystal accumulation and deposition reduce the pipeline's flow cross-section, increase flow resistance, and decrease gas transmission efficiency. In severe cases, it can cause complete pipeline blockage, leading to gas field production interruptions. It can also trigger pipeline ruptures, natural gas leaks, and even explosions and fires. Furthermore, unblocking operations are extremely difficult and costly, and can also shorten the pipeline's service life, hindering the safe and stable development of the gas field.

**Subject:** To prevent clogging of natural gas hydrates in natural gas pipelines and ensure the safety and stability of transportation. First, clarify its generation mechanism and influencing factors. Through the systematic analysis of these mechanisms and factors, it is concluded that desulfurization treatment is an efficient prevention and control method to prevent the formation of hydrate clogging. In the case of known blockages, use a normalization scheme to remove blockages in water and material pipelines.

**Materials and methods:** Combine desulfurization technology with existing normalized pipe cleaning technology to solve the problem of hydrate clogging in natural gas pipelines.

**Results:** Prevention and control of hydrate blockage in natural gas pipelines needs to be based on prevention and supplemented by pipe cleaning technology. Pretreatment desulfurization technology is one of the main preventive methods, which can reduce the possibility of hydrogen sulfide and natural gas combining to form blockages, and reduce the risk of hydrate formation and blockage from the source. For the formed blockage, the operating conditions such as temperature and pressure can be adjusted to destroy the stable structure of the hydrate, quickly decompose and remove the blockage, and ensure the smooth operation of the pipeline.

**Conclusions:** In order to effectively prevent and control the clogging of natural gas pipelines with hydrates. It is recommended to give priority to the pretreatment and desulfurization links, optimize the process parameters to improve the efficiency of impurity removal, choose highly adaptable equipment, regularly monitor the impurity content in the pipeline natural gas, and cut off the hydrate formation conditions from the source. In view of the blockage that has occurred, a standardized emergency response process should be formulated, a reasonable range of temperature and pressure regulation should be clarified, and professional rapid response equipment should be equipped to ensure that the blockage is efficiently decomposed and removed without damaging the pipeline. At the same time, a monitoring mechanism for the normalization of pipeline operation has been established to track key data such as pressure and temperature in real time, predict the risk of blockage in advance, and combine regular maintenance and overhaul to ensure the continuous smooth operation of the pipeline.

**Key words:** Natural gas; hydrates; desulfurization technology