

Брусов Дмитрий Сергеевич, магистрант  
ОГУ им. В.А. БОНДАРЕНКО  
Brusov Dmitry Sergeevich  
OSU named after V.A. Bondarenko

**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ДЕГРАДАЦИИ И МЕТОДОВ  
ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ  
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД  
В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ANALYSIS OF DEGRADATION FACTORS AND METHODS  
OF IMPROVING THE RELIABILITY OF MAIN GAS PIPELINES DURING  
TRANSPORTATION OF HYDROGEN SULFUR-CONTAINING MEDIA  
UNDER LONG-TERM OPERATION CONDITIONS**

**Аннотация.** В статье проанализированы факторы деградации газопроводов с сероводородом, свойства  $H_2S$  и механизмы коррозии. Рассмотрены нормативные требования, методы диагностики и технические решения для повышения надёжности. Предложен комплекс мер по снижению коррозионных рисков и продлению срока службы.

**Abstract.** The article analyzes degradation factors of gas pipelines transporting hydrogen sulfide,  $H_2S$  properties, and corrosion mechanisms. It reviews regulatory requirements, diagnostic methods, and technical solutions to enhance reliability. A set of measures is proposed to reduce corrosion risks and extend the service life of main gas pipelines.

**Ключевые слова:** Магистральный газопровод, сероводород, коррозия, надёжность, длительная эксплуатация, диагностика.

**Keywords:** Main gas pipeline, hydrogen sulfide, corrosion, reliability, long-term operation, diagnostics.

## **1 Теоретические основы надёжности газопроводов при транспортировке сероводородсодержащих сред**

### **1.1 Характеристика сероводородсодержащих сред и их влияние на материалы газопроводов**

Сероводород является одним из наиболее агрессивных компонентов природного газа и представляет серьёзную угрозу для надёжной и безопасной эксплуатации магистральных газопроводов. Он обладает высокой химической активностью, токсичностью и способностью инициировать интенсивные коррозионные процессы. В условиях эксплуатации газопроводов сероводород может присутствовать как в свободном виде, так и в растворённом состоянии, что существенно усложняет процессы защиты металла.

Растворяясь в воде, сероводород образует сероводородную кислоту, а при изменении показателя pH среды – гидросульфид- и сульфид-ионы. Соотношение этих форм зависит от условий эксплуатации, давления и температуры транспортируемой среды, что определяет характер и интенсивность коррозионного воздействия. Увеличение давления и температуры приводит к резкому росту растворимости  $H_2S$ , что особенно характерно для магистральных газопроводов, работающих в условиях высоких эксплуатационных нагрузок.

Воздействие сероводорода приводит к ухудшению физико-механических свойств сталей, используемых в трубопроводных системах. Наблюдаются процессы водородного охрупчивания, снижение пластичности и прочности металла, а также ускоренное развитие дефектов. Эти явления являются одной из ключевых причин деградации трубопроводов при длительной эксплуатации.

### **1.2 Коррозионные процессы и механизмы разрушения материалов**

Коррозионные повреждения газопроводов в сероводородсодержащих средах имеют преимущественно электрохимическую природу. Электрохимическая коррозия развивается при наличии электропроводящей среды, в роли которой выступает конденсированная влага



или водные растворы агрессивных компонентов. При этом на поверхности металла формируются анодные и катодные участки, между которыми протекают электрохимические реакции, приводящие к разрушению материала.

Особую опасность представляет сульфидная коррозия, сопровождающаяся образованием продуктов типа  $\text{Fe}_x\text{S}_y$ , которые формируют гальванические пары со сталью и ускоряют процесс разрушения. Дополнительным негативным фактором является водородное охрупчивание, при котором атомарный водород проникает в кристаллическую решётку металла, вызывая образование трещин и хрупкое разрушение без выраженных внешних признаков коррозии.

На практике в газопроводах с  $\text{H}_2\text{S}$  наблюдаются различные виды коррозионных повреждений: равномерная, язвенная, точечная, межкристаллитная и коррозионное растрескивание. Основные типы коррозии представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Основные типы коррозионного разрушения металла

Развитие локальных форм коррозии наиболее опасно, так как может привести к внезапному образованию сквозных дефектов и аварийным ситуациям.

### 1.3 Нормативные требования и стандарты по надёжности газопроводов с сероводородом

Эксплуатация магистральных газопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие среды, регламентируется рядом национальных и международных нормативных документов. В Российской Федерации основными являются СП 42-101-2002 [1], РД 08-416-02 [2] и СП 13-102-98 [3], устанавливающие требования к проектированию, эксплуатации, выбору материалов и систем защиты металлов в агрессивных средах.

Международные стандарты, такие как ISO 15589-1 [4], NACE SP1592 [5] и ASME B31 [6], определяют комплексные подходы к управлению коррозией, оценке рисков и выбору коррозионностойких материалов. В данных документах [4-6] особое внимание уделяется предотвращению сульфидного растрескивания и водородного охрупчивания, а также необходимости регулярного мониторинга технического состояния трубопроводов.

## 2 Анализ состояния и эксплуатационных проблем газопроводов для сероводородсодержащих сред

### 2.1 Технические характеристики и эксплуатационные условия газопровода

Магистральные газопроводы, предназначенные для транспортировки сероводородсодержащих газов, эксплуатируются в условиях повышенного давления, температурных перепадов и агрессивного воздействия транспортируемой среды. Длительная эксплуатация сопровождается накоплением повреждений, связанных с коррозией, механическими напряжениями и старением материалов.

Эксплуатационные условия включают воздействие грунтовой коррозии, наличие влаги, примесей CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S, а также переменные режимы работы. Совокупность этих факторов приводит к ускоренной деградации труб и снижению надёжности газопровода.

### 2.2 Основные причины отказов и повреждений трубопроводов

Анализ эксплуатационных данных показывает, что основными причинами отказов являются коррозионные повреждения, усталостные трещины, дефекты сварных соединений и водородное охрупчивание. В сероводородных средах особенно опасно коррозионное растрескивание под напряжением, которое может развиваться скрытно и приводить к внезапным разрушениям.

Дополнительными факторами риска являются недостаточная эффективность антикоррозионной защиты, нарушение технологических режимов эксплуатации и недостаточный контроль состояния трубопровода.

### 2.3 Методы контроля, диагностики и оценки состояния газопроводов

Для своевременного выявления дефектов применяются методы неразрушающего контроля, включая ультразвуковую дефектоскопию, внутритрубную диагностику, магнитный контроль и визуальный осмотр [4, 5]. Результаты диагностики позволяют оценить степень коррозионного износа и остаточный ресурс газопровода.

Результаты оценки технического состояния газопровода представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные виды дефектов магистральных газопроводов

Вид дефекта	Характер повреждения	Потенциальная опасность
Коррозионные язвы	Локальное истончение стенки	Сквозные повреждения
Трещины	Продольные и поперечные	Разрыв трубопровода
Дефекты сварки	Напоровы, поры	Потеря герметичности

## 3 Технические решения и мероприятия по обеспечению надёжности газопровода

### 3.1 Выбор материалов и конструктивных решений

Повышение надёжности газопроводов достигается за счёт применения сталей с повышенной стойкостью к сульфидной коррозии, а также использования легированных и нержавеющей сплавов [3, 5]. Конструктивные решения должны учитывать минимизацию концентраций напряжений и обеспечение качественного выполнения сварных соединений.

### 3.2 Методы защиты от коррозии и технологии монтажа

К основным методам защиты относятся нанесение антикоррозионных покрытий, использование катодной защиты и применение ингибиторов коррозии [1, 3, 4]. Комплексное применение этих мер позволяет существенно снизить скорость коррозионных процессов и продлить срок службы газопровода.

### 3.3 Оценка надёжности и системы мониторинга

Современные системы мониторинга позволяют в режиме реального времени отслеживать параметры эксплуатации газопровода и своевременно выявлять отклонения. Рекомендуется внедрение автоматизированных систем контроля коррозии и регулярное обновление программ технического обслуживания.

## Заключение

Транспортировка сероводородсодержащих сред по магистральным газопроводам сопровождается значительными коррозионными рисками. Анализ факторов деградации показал, что основными причинами снижения надёжности являются сульфидная коррозия и водородное охрупчивание. Применение современных материалов, эффективных методов защиты и комплексных систем диагностики позволяет существенно повысить надёжность и безопасность эксплуатации газопроводов в условиях длительной эксплуатации



**Список литературы:**

1. СП 42-101-2002. Газопроводы.
2. РД 08-416-02. Технологические требования по эксплуатации газового оборудования.
3. СП 13-102-98. Защита металлов в условиях агрессивных сред.
4. ISO 15589-1:2006. Pipeline corrosion management.
5. NACE SP1592-2019. Hydrogen Sulfide Related Damage in Oil & Gas Production.
6. ASME B31. Piping Systems for H<sub>2</sub>S service

