

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОТВОДОВ ГАЗОПРОВОДОВ

**Аннотация:** Трубопровод является сооружением большой протяженности и зачастую расположен в труднодоступных местах. Возникающие дефекты приводят к ухудшению состояния материала трубы, что вызывает необходимость непрерывно осуществлять контроль параметров трубопровода с целью предотвращения аварий и несчастных случаев. В статье рассматриваются методы прогнозирования и мониторинга процессов эрозии стенки отвода газопровода, проводится анализ существующих и применяемых методов оценки толщины стенки.

**Ключевые слова:** приборостроение, отводы газопроводов, система мониторинга, методы прогнозирования эрозии газопроводов, измерение толщины стенки.

**Annotation:** The pipeline is a long-distance structure and is often located in hard-to-reach places. The resulting defects lead to deterioration of the pipe material, which makes it necessary to continuously monitor the parameters of the pipeline in order to prevent accidents and accidents. The article discusses methods of forecasting and monitoring the processes of erosion of the wall of the gas pipe bends, analysis of existing and applied methods of wall thickness estimation is also carried out.

*Key words: instrumentation, gas pipe bends, monitoring system, methods of forecasting gas pipeline erosion, wall thickness measurement.*

### **Анализ существующих исследований по теме**

Крайне важно постоянно контролировать конструкции, чтобы оценивать их структурное состояние и обеспечивать раннее предупреждение о структурных повреждениях. На данный момент наиболее распространены метод моделирования и мониторинг трубопроводов для предотвращения аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой промышленности.

### **Причины возникновения эрозии**

Изменение климата, происходящее в течение последних нескольких десятилетий, оказало серьезное влияние на условия, в которых находятся вечномёрзлые грунты [1]. Следовательно, необходимы немалые затраты для обеспечения безаварийной работы и для обеспечения технического диагностирования.

Эрозия фитингов труб, таких как отводы и геометрия, изменяющая направление потока, более серьезна, чем прямые трубы. Негерметичность трубопровода может привести к производственным потерям и негативно повлиять на окружающую среду. Скорость потери толщины стенки является важным параметром, по которому производится определение процесса коррозии и эрозии. Скорость определения потери толщины стенки напрямую связана с тем, насколько быстро можно вмешаться в процесс, который движется в неправильном направлении.

Транспортировка природного газа, нефти и других жидких и газообразных продуктов осуществляется по трубопроводам различных типов. Для большинства механических систем прогрессирование износа в течение срока службы можно описать тремя стадиями - приработка, стационарное состояние (устойчивое) и окончание срока службы.

Несмотря на множество исследовательских работ по улучшению их

чувствительности и точности, необходимы дальнейшие усилия, чтобы они были готовы к работе в полевых условиях, особенно для покрытия больших объемов. Этому может способствовать значительный прогресс в различных областях, связанных с информационными технологиями (ИТ) и приборами, такими как волоконно-оптические датчики и беспроводные датчики с автономным питанием в рамках парадигмы I4.0. Песок и мелкие частицы иногда образуются вместе с пластовыми флюидами, особенно из слабоконсолидированных песчаников и являются основной проблемой безопасной эксплуатации. Обнаружение дефектов трубопровода в режиме реального времени является важной мерой безопасности.

Среди арматуры трубопровода некоторые фитинги, такие как острые изгибы, колена и тройники, более подвержены эрозионному износу [2].

Когда жидкость или газ, содержащие твердые частицы, осуществляют движение внутри трубопровода, это может легко вызвать истончение стенки трубопровода и даже протечки. Они оказывают серьезное воздействие на трубопровод из-за его эффективности работы и безопасности транспортировки.

Повреждение трубопроводов может привести к потенциально катастрофическим гуманитарным, социальным, экономическим и экологическим последствиям. Отказы трубопроводов являются серьезной проблемой газотранспортной отрасли. Частое возникновение неисправностей связано с коррозией труб или авариями. Отвод используется для изменения направления потока частиц материала, но при этом неизбежно вызывает сегрегацию частиц, осаждение и потерю давления в системе. Отводы, как наиболее уязвимые части транспортных трубопроводов, подвержены риску выхода из строя из-за наличия в турбулентном потоке частиц песка. Колено 90° является одним из наиболее подверженных эрозионно-коррозионным повреждениям участков трубопроводной системы сбора и транспорта сланцевого газа. Эрозия является основной причиной повреждения и

сокращения срока службы трубопроводов на путях транспортировки нефти и газа. Это приводит к дорогостоящим перерывам в работе, что приведет к сопутствующим сбоям в логистике транспортировки жидкостей и приведет к значительным производственным потерям в контролируемых системах. Данная проблема возникает как на промысловых трубопроводах, предназначенных для транспортировки газа и нефти от месторождения до установок комплексной подготовки, так и на распределительных трубопроводах. Ил, песок и твердые частицы из геологических резервуаров входят в состав флюидов, добываемых нефтяными и газовыми скважинами.

В последние десятилетия исследования выноса песка проводились по нескольким направлениям, включая прогнозирование выноса песка, мониторинг выноса песка, борьбу с выносом песка и анализ целостности ствола скважины для предотвращения или уменьшения выноса песка и его последствий.

Неопределенность распространена в параметрах, влияющих на эволюцию процесса коррозии. Фундаментальным требованием с точки зрения проектирования является увеличение срока службы компонентов, подверженных эрозии.

Во многих случаях обычный визуальный контроль не может обнаружить начальные стадии образования дефектов, которые часто имеют малозаметную форму, для обычных дефектов трещин в промышленном секторе. Применение защитных покрытий, частые проверки и плановое техническое обслуживание приводят к огромным прямым и косвенным финансовым потерям для организаций. Оперативное обнаружение разрушения покрытия и коррозионных повреждений может привести к точному и экономичному техническому обслуживанию в зависимости от состояния. В то время как сеть трубопроводов может быть спланирована и построена так, чтобы удовлетворять требованиям жестких условий, довольно сложно избежать последующего появления утечек в трубопроводе в течение срока службы

системы. Производство, транспортировка и хранение сжиженного природного газа является перспективным направлением газовой промышленности благодаря ряду преимуществ топлива, таких как высокие показатели энергоемкости, уменьшенный объем хранения по сравнению с природным газом в газовой - состоянии воздуха, и его экологическая эффективность. Было выполнено много исследовательских работ по моделированию и экспериментальному тестированию эрозии нефтепромысловых труб (или инструментов), таких как колена и тройник.

Скорость потока частиц может влиять на соотношение между скоростью газа-носителя и скоростью уносимых частиц.

Например, частицы песка, образующиеся при добыче нефти, или частицы катализатора, преднамеренно добавленные для ускорения химических реакций, представляют угрозу для целостности транспортных и технологических компонентов нефтяной установки, таких как трубы, циклонные сепараторы и предохранительные клапаны.

Траектория частицы определяется на основе среднего значения и турбулентности поля течения. Скорость общего эродированного объема остается относительно постоянной для каждого значения скорости песка.

### **Методы прогнозирования эрозии газопроводов**

Численное моделирование позволяет составить прогноз распределения эрозии, оценить поведение потока и состояние стенки отвода.

Прогнозирование эрозии в однофазных и многофазных потоках с песком представляет собой сложную задачу, поскольку существует множество взаимодействующих друг с другом параметров, вызывающих удар частиц о стенку трубы и эрозию.

До сих пор было идентифицировано несколько факторов, влияющих на эрозию твердых частиц, среди которых скорость удара частиц, угол удара частиц, свойства частиц, такие как материал, форма, размер, острота, и свойства целевой поверхности, такие как материал, твердость, пластичность и

условия течения. Признано, что они значительно влияют на эрозию твердых частиц и ее механизмы.

Большинство доступных в настоящее время моделей эрозии на основе CFD и экспериментальных данных петлевых испытаний сосредоточены на изгибе трубы с газо-твердым потоком.

Модель на основе CFD является наиболее полным и сложным подходом к прогнозированию эрозии.

Наихудшим сценарием для потока жидкость-твердое тело считается конфигурация  $180^\circ$ , а для потока жидкость-газ-твердое тело - конфигурация  $90^\circ$  [3]. Таким образом, важно понимать поведение эрозии с ориентацией изгибов. По сравнению с ударом, происходящим в первом колене  $90^\circ$ , больше частиц с более высокой скоростью принимают участие в ударе второго колена  $90^\circ$ , что приводит к более сильной эрозии.

Для лучшего понимания эрозии был разработан метод прогнозирования эрозии на основе вычислительной гидродинамики (CFD). Вычислительная гидродинамика появилась как альтернативный инструмент для прогнозирования эрозии в последние годы. Процесс эрозии изучается уже на протяжении долгого времени, однако данный метод прогнозирования появился относительно недавно [4].

В настоящем исследовании динамическая сетка, связанная с эрозией, использовалась для оценки потери толщины из-за эрозионного износа твердыми частицами в стандартном отводе  $90^\circ$ . Этот метод предсказывает изменение топологии сетки, что приводит к реалистичной деформации поверхности, отражающей серьезность эрозионного повреждения.

На рисунке 1 представлено моделирование процесса эрозии для отвода.

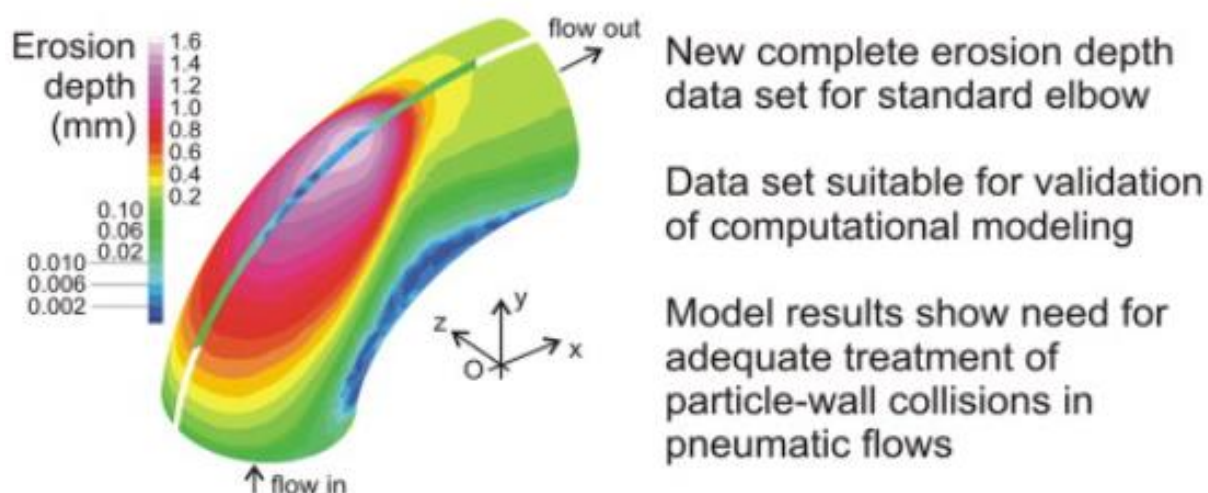


Рисунок 1. Моделирование процесса эрозии [4]

Отводы трубопроводов имеют широкое применение во многих инженерных процессах. При транспортировке твердых частиц через данный участок, возникает износ материала стенки трубы, что является причиной замены данного участка или его отказа.

Метод CFD моделирования представляет собой вычисление потоковых характеристик процессов при помощи вычислительных и физико-математических методов.

В то время как экспериментальные измерения предоставляют ощутимые данные о скорости эрозии, происходящей при определенных условиях эрозионного потока, часто быстрее и эффективнее использовать вычислительную гидродинамику (CFD) для исследования широкого спектра различных условий потока через колена. Однако точность моделирования CFD сильно зависит от модели эрозии, включенной в численный анализ.

Отвод трубы является одной из важных частей системы трубопровода, которая подвергается эрозионному износу из-за значительного влияния скорости частиц, размера частиц, концентрации частиц и т. д., что в конечном итоге приводит к выходу из строя системы.

Многие исследователи провели последующие эксперименты, чтобы получить данные о распределении эрозии в колене 90°. В основном



использовались два экспериментальных метода. В некоторых случаях массу отвода измеряют до начала эксперимента, а затем в последующие моменты времени после начала эксперимента. Этот метод «потери массы» позволяет количественно оценить общий эффект эрозии на отводе, но не дает распределения потери массы вокруг отвода. Второй метод заключается в измерении изменения положения внутренней поверхности отвода. Измерение обычно выполняется с помощью ультразвуковых преобразователей для определения толщины стенки трубы по ее внешней поверхности. Исследования показали, что эрозия с увеличением угла изгиба от  $30^\circ$  до  $90^\circ$  увеличивается.

Предполагается, что важными параметрами величины эрозии являются характеристики материала, диаметр трубы, свойства и размер частиц.

Было проведено исследование влияния диаметра трубы и радиуса кривизны на скорость эрозии. На рисунке 2 представлены полученные данные.

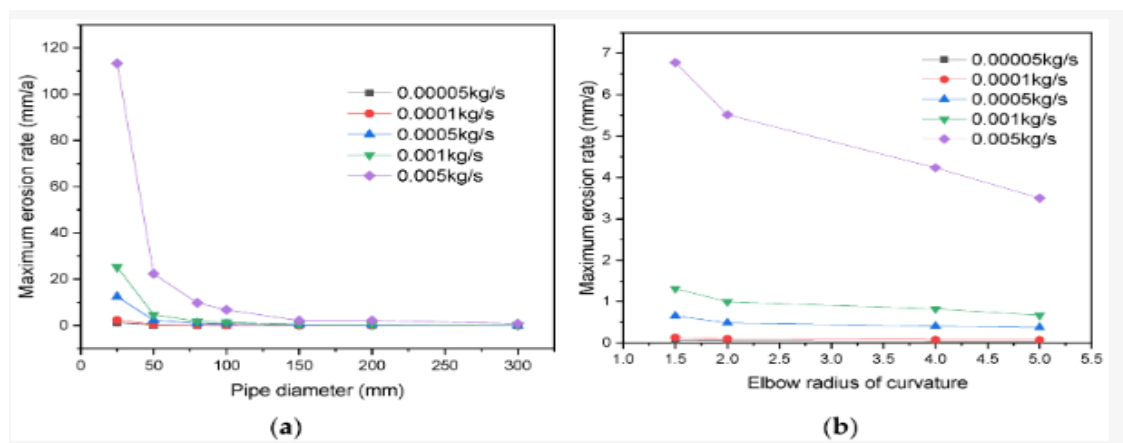


Рисунок 2. Влияние диаметра трубы и радиуса кривизны изгиба на максимальную скорость эрозии [5]

Когда диаметр трубы меньше 80 мм, по мере увеличения диаметра трубы максимальная скорость эрозии стенки трубы быстро уменьшается; но когда диаметр трубы превышает 80 мм, максимальная скорость эрозии стенки снижается медленно. Исследовано влияние четырех видов радиуса кривизны колена 1,5D, 2D, 4D и 5D на максимальную скорость эрозии [5]. Из рисунка 2 (б) видно, что максимальная скорость эрозии стенки трубы уменьшается с



увеличением радиуса кривизны изгиба, и тенденция к уменьшению более очевидна, когда радиус мал. Это связано с тем, что путь изгиба становится длиннее с увеличением радиуса локтя; когда радиус изгиба составляет  $4D$  и  $5D$ , частицы дважды ударяются о стену в изгибе, что приводит к увеличению площади эрозии; но когда радиус колена составляет  $1,5D$  и  $2D$ , частицы воздействуют на стенку трубы более интенсивно, поэтому зона эрозии более концентрированная [5].

Области вторичной эрозии не наблюдались даже при односторонней связи (отсутствии столкновений между частицами). Однако когда была активирована подходящая модель шероховатости стенки, а это означает, что взаимодействие частиц со стенками вносит основной вклад в дисперсию частиц в пристеночной области.

При исследовании эрозии частиц в основном используются три метода исследования: модельное исследование, экспериментальное исследование и численное моделирование.

Два типа повреждения из-за эрозии возникают из-за комбинированного эффекта первого столкновения, вторичного столкновения и скользящего столкновения. Данные повреждения представлены на рисунке 3.

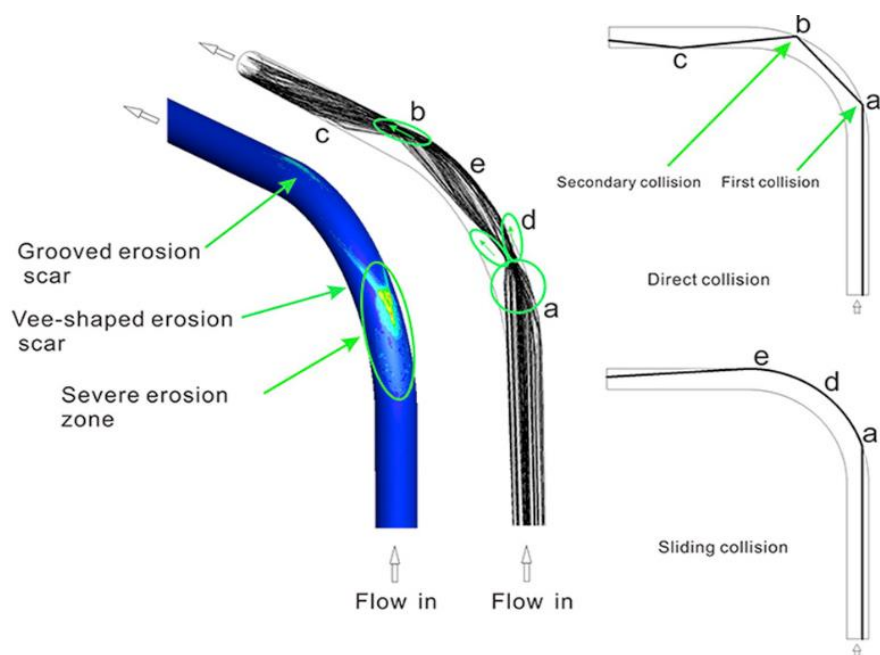


Рисунок 3. Повреждения, возникающие из-за эрозии [6]

## Системы мониторинга трубопровода

Преимущества метода дистанционного мониторинга трубопроводов:

- Наблюдение за параметрами в режиме реального времени;
- Возможность диагностировать труднодоступные сегменты;
- Повышение точности данных;
- Надежность и безопасность всего трубопровода;
- Быстрое обнаружение и уведомление об утечках и проблемах, уменьшение ущерба;
- Осуществление измерений с заданным интервалом времени.

Для оптимизации конструкции технологического оборудования и системы трубопроводов важно определить место и величину максимальной скорости эрозии для однофазных течений в отводах. При изменении направления потока после выхода из первого колена также меняются распределения скорости и концентрации песка.

Прогнозирование тяжести и местоположения эрозии важно для определения частоты замены и затрат на капитальный ремонт запасных частей и компонентов объекта.

За прошедшие годы были приняты различные методы для количественной оценки и характеристики эрозии поверхности из-за ударов частиц. Было замечено, что датчики электрического сопротивления, ультразвуковые измерения, и трехмерные оптические метод сканирования, как правило, предпочтительнее для достижения относительно высокой точности измерения потерь материала в компонентах при работе с твердыми частицами .

Традиционные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковая толщинометрия, вихревые токи и рассеяние магнитного потока, широко используются для автономной оценки остаточной толщины стенки. Такие измерения выполняются во время периодических остановов на техническое обслуживание, как правило, раз в 1–2 года, поэтому время отклика таких методов очень медленное.

Большинство неакустических методов непосредственно оценивают структуру трубы на наличие возможных дефектов, применяя электромагнитные волны, ультразвуковые волны, вихретоковые методы, термическое профилирование и методы визуального контроля. Дефекты вызывают утечку и создают шумовые сигналы с определенной частотой.

Воздействие условий окружающей среды и изменение свойств материала трубы по мере старения затрудняет количественную оценку механизма износа трубы.

Наиболее распространенными датчиками, используемыми сегодня в сетях подземных вод и сточных/канализационных труб, являются ультразвуковые датчики, пассивная и активная акустика, но также используются и другие технологии, такие как видеонаблюдение, лазерное профилирование, вихретоковый контроль (ECT) и утечка магнитного потока (MFL). Типичная конфигурация включает в себя один преобразователь (импульс-эхо) или пару преобразователей (шаг-захват), которые обычно прикрепляются к внешней стороне трубы. Ультразвуковые объемные волны чаще всего генерируются пьезоэлектрической керамикой или полимерами, которые требуют контакта, жидкой или твердой контактной среды. Однако применяются и бесконтактные датчики.

Хотя традиционно эти методы применялись к трубам вручную или устанавливались на роботов, управляемых человеком, они хорошо подходят для использования в сочетании с автономными инспекционными роботами.

Общие методы мониторинга трубопроводов включают оптоволокно, спутниковые системы, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), сейсмические датчики, патрульные группы, методы баланса массы и беспроводной сети датчиков (WSN). WSN может быть развернута под поверхностью земли для мониторинга трубопроводов, проложенных под землей.

Благодаря непрерывному сбору и хранению текущего сигнала от каждого датчика и назначению его узла данные передаются в гибридное облако с надлежащим шифрованием и аутентификацией. Среди искомых преимуществ первостепенное значение имеют снижение затрат и повышение надежности и прозрачности. В то же время они обеспечивают дополнительную функциональность, включая обработку данных. WSN включает узлы, также известные как узлы беспроводных датчиков, которые связаны между собой по беспроводной сети для измерения и обнаружения физических величин, таких как температура, давление, звук, видео и т.д. Система внедряется с двумя методами: глобальной системой мобильной связи (GSM) и сетью вещей (WoT) для облегчения задач мониторинга и контроля.

#### **Использованные источники:**

1. Svendsen, B.T., Frøseth, G.T., Øiseth, O. et al. A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data // J Civil Struct Health Monit 12. 2022. Vol. 34, no 3. pp. 101–115.
2. A. Farokhipour, Z. Mansoori, M.A. Rasoulilian, A. Rasteh, M. Saffar-Avval, G. Ahmadi. Study of particle mass loading effects on sand erosion in a series of fittings // Powder Technology. 2020. Vol. 373. pp. 118-119.
3. Thiana A. Sedrez, Siamack A. Shirazi. Erosion evaluation of elbows in series with different configurations // Wear. 2021. Vol. 476. pp. 83-84.
4. E.B. Priyanka, S. Thangavel, Xiao-Zhi Gao. Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system // Petroleum Research. 2021. Vol. 6, Issue 1. pp. 77-78.
5. Hong, Bingyuan, Xiaoping Li, Yanbo Li, Yu Li, Yafeng Yu, Yumo Wang, Jing Gong, and Dihui Ai. Numerical Simulation of Elbow Erosion in Shale Gas Fields under Gas-Solid Two-Phase Flow // Energies. 2021. Vol. 14, no. 13. p. 33.

6. Jasem Alqallaf, Joao A. Teixeira. Numerical study of effects of solid particle erosion on compressor and engine performance // Results in Engineering. 2022. Vol. 15. pp. 39-40.