

2. Байков И.Р., Костарева С.Н., Смородова О.В. Энергосбережение при эксплуатации насосов // Нефтегазовое дело. – Уфа, 2016. – № 14-3. – С. 84 – 87.
3. Бордовский А.М., Вьюн В.И., Кузьминский Ю.Г. Влияние параметров технологического оборудования участка нефтепровода на производительность и эффективность использования электроэнергии // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та имени П. О. Сухого. – Гомель, 2003. – № 1. – С. 73 – 82.
4. Евтух К.А., Вязунов Е.В., Бархатов А.Ф. Об экономической эффективности замены узлов дросселирования давления на нефтеперекачивающих станциях частотно-регулируемыми приводами или гидромуфтами // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – Москва, 2014. – № 2. – С. 15 – 21.
5. Фиков, А. С. Потенциал энергосбережения от очистки магистральных нефтепроводов // Вестник Белорусско-Российского университета. – Могилев, 2010. – № 1. – С. 174 –181.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ УЧАСТКА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОТ УСТАНОВКИ ПОДГОТОВКИ ГАЗА ДО ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ПУНКТА

О.А. Курасов

Научный руководитель - профессор П.В. Бурков

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Обеспечение безаварийной и надежной работы промысловых газопроводов (ГП) является приоритетной задачей в системе трубопроводного транспорта газа. Вопреки принимаемым мерам по предотвращению внештатных ситуаций при обеспечении бесперебойных поставок природного газа конечному потребителю на уровне проектных параметров, аварии все равно происходят. Это свидетельствует о недостаточной эффективности существующих способов их предупреждения. Одна из причин – отсутствие универсальной методики комплексного анализа ГП, позволяющего следить за их техническим состоянием в течение всего жизненного цикла.

При рассмотрении проблемы поддержания работоспособности и надежности газотранспортных систем (ГТС) очень важно учитывать состояния стенок ГП и сварных швов, а также конкретный этап их деформационного старения на основе статистических подходов, использующих данные об оценках и регулировании рисков. Это дает возможность спрогнозировать остаточный ресурс трубопроводов и создать расчетные методики его оценки на основе внешних воздействий и обнаруженных дефектов [3].

Объектом исследования является распределительная газовая сеть нефтегазовой компании, предназначенная для обеспечения природным газом потребителей. Начало трассы – установка подготовки газа (УПГ), конец трассы – газораспределительный пункт (ГРП). Участок ГТС является ГП высокого давления II категории с  $P_y$  0,6 МПа, длиной 7,4 км и не относится к магистральным ГП. В качестве проектных решений при оценке вероятности возникновения инцидентов и анализе безопасности и рисков на исследуемом участке рассматриваются опасные производственные объекты (ОПО) – участок трубопровода, прокладываемый подземно и параллельно основному трубопроводу (лупинг) вдоль всей его трассы длиной 7,8 км, и горизонтальный стальной резервуар (газгольдер) объемом 300 м<sup>3</sup>, установленный на УПГ.



**Рис. 1** План участка ГТС. Красная линия – проектируемый лупинг, выделенная область – УПГ, на которой предполагается установить газгольдер

Для обеспечения надежной работы эксплуатируемых ГП и для качественного проектирования новых очень важно совершенствовать методы расчета их напряженно-деформированного состояния (НДС). Один из эффективных методов технической диагностики промысловых ГП – исследование НДС на участках, подверженных влиянию опасных природных и техногенных факторов. Своевременная информация о действующих механических напряжениях на таких участках дает возможность оперативно принимать меры по предупреждению аварийных ситуаций.

Газгольдеры постоянного объема относятся к промышленным конструкциям высокого давления, которые также находятся в сложном НДС. Напряженные состояния отдельных их элементов возникают уже на стадии изготовления и проведения строительно-монтажных работ. Последующий рост величины напряжений в элементах конструкции резервуара является следствием действия эксплуатационных нагрузок, что, в конечном счете, приводит к риску возникновения аварийной ситуации. Поэтому обеспечение надежности и увеличение срока полезного

использования газгольдеров требуют комплексного рассмотрения вопросов снижения риска возникновения внештатных событий, диагностики и ремонта газового оборудования.

Для обеспечения надежной эксплуатации ГП приоритетной является разработка мероприятий по предупреждению инцидентов и аварий, а не ликвидация их последствий. Для определения расчетной схемы, адекватно описывающей состояние промышленного ГП под действием эксплуатационных и внешних воздействий, необходимо исследовать его конструкционную надежность, которая обуславливает способность сопротивляться внешним и внутренним нагрузкам и воздействиям, возникающим при транспорте газа, без нарушения целостности при соблюдении норм и правил эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [1].

Разработка алгоритма анализа и мониторинга рисков, а также сценариев развития неблагоприятных ситуаций, осуществляется исходя из расчетов параметров функционирования ОПО. В общем виде последовательность расчета выглядит следующим образом: «прочность,  $R_p(\tau)$  → жесткость,  $R_\beta(\tau)$  → устойчивость,  $R_\lambda(\tau)$  → ресурс,  $R_{N\tau}(\tau)$  → надежность,  $P_{QR}(\tau)$  → живучесть,  $L_{id}(\tau)$  → безопасность,  $S(\tau)$  → риск,  $R(\tau)$  → защищенность,  $Z_k(\tau)$ ». Все параметры являются функциями времени  $\tau$ , на всех стадиях их жизненного цикла.

Расчет вероятности возникновения инцидентов на ГП распределительных сетей можно провести с помощью теоремы Пуассона

$$P = \frac{(\lambda \cdot T)^N \cdot e^{-(\lambda \cdot T)}}{N!}, \quad (1)$$

где:  $\lambda$  – среднее число инцидентов за время исследуемого периода  $T$ ;  $N$  – число инцидентов.

Защищенность  $Z_k(\tau)$  определяется через формирующиеся  $R(\tau)$  и приемлемые  $[R(\tau)]$  риски

$$Z_k(\tau) = R(\tau) \cdot \{1 - [R(\tau)] / R(\tau)\}. \quad (2)$$

Риски  $R(\tau)$ , формирующиеся на данной стадии  $\tau$  жизненного цикла, научно обосновываются и оцениваются по вероятностям  $P(\tau)$  возникновения отказов, аварийных или катастрофических ситуаций и сопутствующим им ущербам  $U(\tau)$

$$R(\tau) = P(\tau) \cdot U(\tau). \quad (3)$$

Приемлемые риски  $[R(\tau)]$  на основе анализа критических отказов, аварий и катастроф назначаются по наиболее опасным, критическим параметрам  $P_k(\tau)$ ,  $U_k(\tau)$ ,  $R_k(\tau)$  с введением запасов по рискам  $n_R$  ( $n_R \geq 1$ )

$$[R(\tau)] = \frac{R_k(\tau)}{n_R} = \frac{P_k(\tau) \cdot U_k(\tau)}{n_R}. \quad (4)$$

Безопасность объекта  $S(\tau)$  оценивается по неравенствам

$$S(\tau) > 0 \quad \text{при} \quad R(\tau) \leq [R(\tau)]. \quad (5)$$

Надежность  $P_{QR}(\tau)$  определяется по вероятностным характеристикам эксплуатационной нагруженности  $Q(\tau)$  и ресурса  $R_{N\tau}(\tau)$  на основе функций распределения  $f$  эксплуатационных воздействий  $Q^3(\tau)$  и предельных нагрузок  $Q_k(\tau)$  для заданных величин  $N_k$ ,  $\tau_k$ . Оценка вероятности возникновения и анализа сценариев развития аварийных событий осуществляется с помощью методов «дерева событий» или «дерева отказов» – алгоритмов построения последовательности событий, исходящих из основного события по опыту предшествующей эксплуатации этих же объектов. Поэтому технический риск определяется как

$$R_t(\tau) = 1 - P_{QR}(\tau). \quad (6)$$

Устойчивость  $R_\lambda(\tau)$  определяется расчетом на потерю устойчивости

$$R_\lambda = \frac{Q_k(\tau)}{Q^3(\tau)} = n_y, \quad (7)$$

где:  $Q_k(\tau)$  – критические нагрузки при потере устойчивости;  $Q^3(\tau)$  – деформации при эксплуатационных воздействиях;  $n_y$  – запас на устойчивость ( $n_y \geq 1$ ).

Система выражений (1) – (7) состоит из основных зависимостей, необходимых для расчетно-экспериментального анализа и определения ключевых параметров безопасности, рисков и защищенности ГТС [2].

В настоящее время существует вероятность возникновения инцидентов на газовых сетях и сооружениях газораспределительной сети. Основной задачей работы ГП следует считать разработку мероприятий, позволяющих предупреждать аварии, а не ликвидировать их последствия. С целью обеспечения необходимых технико-экономических показателей ГТС необходимо увеличить надежность и безотказность работы ГП с помощью проведения регулярных мероприятий по диагностике, ремонту, реконструкции и модернизации составляющих частей промышленного ГП. Выполнение комплекса этих работ позволит также проектировать ГП с высоким уровнем надежности и поддерживать его на протяжении всего периода эксплуатации.

#### Литература

1. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. – Новосибирск: Наука, 2017. – 724 с.
2. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Фундаментальные закономерности техногенной безопасности в обосновании перспективных газотранспортных систем // Вести газовой науки. – 2018. – №. 2 (34).

3. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности. – Новосибирск: Наука, 2005. – 610 с.

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА ТОРСИОНА ПРИВОДА ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ МЕТОДАМИ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Т.Е. Лобкова

Научный руководитель - профессор К.В. Сызранцева  
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Одной из важных проблем нефтегазовой промышленности является обеспечение безопасной и надежной транспортировки нефти, газа, а также различных нефтепродуктов. Транспортировка осуществляется через трубопроводы с разнообразной запорной и запорно-регулирующей арматурой.

На магистральных трубопроводах запорная арматура используется с целью полного открытия или закрытия потока жидкости. К запорной арматуре относятся: задвижки, клапаны, краны и затворы поворотные. В качестве устройств запорной арматуры на магистральных трубопроводах используют задвижки и шаровые краны, которые обеспечивают минимальное гидравлическое сопротивление.

Для управления запорной арматурой используются приводы. Для обеспечения длительной и надежной эксплуатации к приводу предъявляются следующие требования: надежность и плавность хода.

В 2017 году была разработана новая бесступенчатая трансмиссия, которая позволяет приводу соответствовать предъявленным требованиям. Трансмиссия может применяться как в транспортных машинах, так и в запорной арматуре. Принципиальная кинематическая схема бесступенчатой представлена на рисунке 1.

Принцип работы передачи следующий. Вращение входного вала, который состоит из передней и хвостовой частей, при помощи генератора колебаний преобразуется в колебательное движение коромысел. Коромысла жестко соединены с ведущими элементами механических выпрямителей. Торсионы через суммирующий редуктор передают вращение на входной вал. Торсионы, растягивая импульсы момента по времени, обеспечивают перекрытие непрерывности момента на входном валу. Ведомый вал, соединенный с конической шестерней, обеспечивает вращение шпинделя задвижки, который соединен с коническим колесом, в сторону закрытия или открытия трубопровода.

На различных режимах нагружения торсионов характер работы передачи в пределах одного оборота ведущего вала отличается. При стоповом режиме, когда ведомый вал передачи неподвижен, задние концы торсионных валов тоже неподвижны, а передние, которые соединены с ведомыми элементами выпрямителей, поворачиваются в сторону рабочего хода коромысла. При этом выпрямители включены в течение всего оборота ведущего вала. Торсионы закручиваются, в результате чего происходит их упругая деформация.

Данный новый тип бесступенчатой механической трансмиссии позволяет преодолеть технические противоречия, когда для преодоления значительного момента, который требуется для закрытия задвижки, необходимо большое передаточное число в приводе, а для того, чтобы закрыть задвижку передаточное число должно быть небольшим [3].

Трансмиссия обладает важным свойством – регулируемой внутренней автоматичностью – то есть при изменении внешней нагрузки передача может изменять передаточное отношение. Регулируемая внутренняя автоматичность обеспечивается внутренней силовой функцией, которая создается благодаря закрутке торсионных валов.

Торсион является наиболее слабым звеном данной бесступенчатой передачи. Поэтому необходимо разработать методику оценки вероятности отказа торсиона.

В процессе ходовых испытаний трансмиссии была получена выборка экспериментальных данных по углу закручивания при стоповом режиме нагружения. Анализ данных выборки показал, что она не соответствует нормальному закону распределения. Для обработки данных, вид распределения которых неизвестен, применяется метод, основанный на применении непараметрической статистики. Данный метод позволяет исключить погрешности, вызванные заменой реального распределения случайной величины угла закручивания близкими к нему «удобными» имеющими аналитическое описание известными распределениями [2].

Для оценки вероятности отказа торсиона необходимо восстановить неизвестную функцию плотности действующих напряжений. Для этого также используются методы непараметрической статистики: оценка Розенблатта-Парзена [1, 2], в соответствии с которой функция плотности распределения угла закручивания торсиона записывается так:

$$P_{\tau}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot N \cdot h_N^*} \sum_{i=1}^N \exp \left[ -0,5 \left( \frac{\tau - \tau_i}{h_N^*} \right)^2 \right].$$

Результат восстановления функции плотности распределения, а также гистограмма выборки касательных напряжений в поверхностном слое торсиона показаны на рисунке 2.

Вероятность безотказной работы торсиона оценивается как вероятность того, что напряжения в поверхностном слое торсиона не превышают предел выносливости на кручении материала и соответствует вычислению значения следующего интеграла:

$$P_F = 1 - \int_0^{\tau_m} \left[ \int_0^{\tau_m} P_{\tau}(\tau + \tau_{Lim}) \cdot P_{\tau_{Lim}}(\tau_{Lim}) d(\tau_{Lim}) \right] d(\tau).$$