Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. Л. Тарасов, С. Н. Перов, С. Л. Логвинов, Решение проблемы обеспечения надежности и ресурса трубопроводных систем при их проектировании, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2003, выпуск 19, 122–128

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu151>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.85.5.30

26 апреля 2023 г., 17:06:51

Проблемы надежности

УДК 621. 64

Ю.Л. Тарасов, С.Н. Перов, С.Л. Логвинов

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

В работе методы и опыт обеспечения надежности и срока службы конструкций летательных аппаратов распространяется на обеспечение надежности трубопроводных систем различного назначения.

Задача обеспечения надежности и ресурса магистральных трубопроводных систем является актуальной. Это обусловлено тем, что в Российской Федерации протяженность магистральных нефте- и газопроводов составляет около 200 тыс. км., промысловых трубопроводов – 350 тыс. км. Для их функционирования используется около 800 компрессорных и нефтегазоперекачивающих станций. Значительная часть трубопроводов устарела физически, так как они служат от 15 до 35 лет. В такой ситуации вероятность разрывов трубопроводов от действия волновых и вибрационных процессов многократно возрастает. Об этом свидетельствует ежегодный прирост аварийности, который по различным оценкам равен от 5 до 9% [1]. Аварии, связанные со сбросом нефти и нефтепродуктов, составляют до 60% техногенных чрезвычайных ситуаций с экологическими последствиями [2].

В магистральных нефте- и газопроводах отмечается неустановившийся режим течения нефти или газа. Давление рабочей среды меняется по длине трубопровода и во времени в результате неравномерности потребления и отбора, включения и выключения компрессорных и насосных агрегатов, перекрытия запорных устройств, изменения вязкости перекачиваемого продукта при последовательной перекачке. Волны повышенного и пониженного давлений, возникающие при отключении промежуточных перекачивающих станций из-за прекращения подачи электроэнергии, вызывают динамические нагрузки, которые могут вызвать напряжения, превышающие разрушающие напряжения для элементов трубопровода. Это может явиться причиной аварии линейной части трубопровода. При этом срабатывает защита по максимальному и минимальному допустимым давлениям, останавливаются смежные насосные станции. Градиенты давлений при отключении одного насоса промежуточной станции достигают 0,3...0,4 МПа, а при отключении насоса на головной станции – 0,6...0,8 МПа.

Градиенты давлений, возникающие по этим и другим причинам, являются причиной снижения усталостной прочности трубопровода [3].

При проектировании сложных механических систем, в том числе и трубопроводных, закладывается необходимый уровень надежности – вероятности безотказного функционирования элементов их конструкций в течение заданного срока службы в реальных условиях эксплуатации. При производстве и эксплуатации уровень надежности, заложенный при проектировании, реализуется и расходуется [4].

В настоящей работе рассматриваются средства и методы обеспечения надежности, принятые конструктивно-технологические решения при проектировании элементов трубопроводных систем с учетом условий эксплуатации. Эта проблема решается с учетом влияния совокупности конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, с одной стороны, а также с учетом стохастического характера эксплуатационных нагрузок и рассеивания характеристик вязкости и прочности элементов конструкции – с другой. При этом анализируется прочностная надежность элементов конструкций, под которой понимается вероятность отсутствия отказа из-за потери прочности за заданное время эксплуатации изделия. Надежность $H(t)$ трактуется как вероятность пребывания функции качества $n(t)$ в заданной области Ω_0 в течение требуемого времени t [5]:

$$H(t) = P[n(t) \in \Omega_0, 0 \leq t \leq t]. \quad (1)$$

Вычислению функции надежности предшествуют три этапа: схематизация системы и внешнего воздействия, решение задачи статистической динамики, выбор области допустимых состояний Ω_0 .

При схематизации конструкция линейной части трубопровода представляется в виде системы соединенных между собой элементов. К одной группе относятся элементы конструкции, для которых недопустимо появление дефектов и повреждений, к другой – конструктивные элементы с дефектами (непровары, поры, растрескивание), которые могут возникнуть как при изготовлении, так и в условиях эксплуатации, – усталостные трещины.

При расчёте надёжности конструкции как сложной системы учитывается возможность постепенных отказов в результате длительного действия на конструкцию нагрузок раннего уровня и внезапных отказов при действии максимальных нагрузок, возникающих при неблагоприятных, но вполне реальных условиях и режимах работы конструкции.

Это учитывается путём схематизации элемента конструкции в виде модели из двух последовательно соединённых фиктивных элементов, под которыми подразумевается реальный элемент, имеющий лишь один вид отказа – внезапный или постепенный. При рассмотрении конструктивной схемы конкретной газопроводной системы необходимо провести структурный анализ, при котором газопровод рассматривается как протяжённая система, состоящая из однородных по способу прокладки, грунтово-геологическим, климатическим и эксплуатационным условиям, участков. Для выделенной группы участков характерны отказы, имеющие одинаковую природу, причина отказа описывается одним и тем же критерием наступления предельного состояния.

Схематизация конструкции газопроводной системы представлена на рис. 1.

Общую задачу статистической динамики предлагается представить из двух частных, из которых первая сводится к определению вероятностных законов распределения внутренних силовых факторов для участка конструкции. Вторая задача решается на уровне отдельных частей этого участка конструкции трубопровода, где внешним воздействием являются уже внутренние силовые факторы, вероятностные характеристики которых получены при решении первой задачи.

Расчетные нагрузки и воздействия на конструкцию трубопровода регламентируются Строительными нормами и правилами (СНиП). В зависимости от выбранной конструктивной схемы и способа прокладки трубопровода следует учитывать следующие группы нагрузок и воздействий.

Нагрузки для подземных частей трубопроводов: внутреннее давление перекачиваемого продукта; температурные нагрузки, вызванные несовпадением эксплуатационной температуры

Р и с. 1. Схематизация конструкций.

стенок трубопровода и температуры замыкания конструкции при монтаже; нагрузки, вызывающие искривление продольной оси трубопровода; нагрузки от грунта засыпки.

Нагрузки для надземных трубопроводов, проложенных на свайном основании: внутреннее давление перекачиваемого продукта; нагрузки от массы конструкции и транспортируемого продукта с учетом режимов эксплуатации; дополнительные массовые нагрузки от размещенного оборудования и строительных конструкций; нагрузки, вызванные обледенением и налипанием снега; температурные нагрузки, вызванные несопадением условий эксплуатации и монтажа; ветровые нагрузки.

Нагрузки при нестандартных условиях, вызванных следующими особенностями трассы трубопровода: заболоченные и подтопленные территории; территории с подповерхностными пустотами различного происхождения (шахты, карстовые пустоты); сейсмоопасные зоны; зоны вечномёрзлых грунтов; оползневые зоны.

Поскольку в общей постановке аналитическое решение задачи статистической динамики для ЛЧМТ оказывается невозможным, используется численный метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). При этом каждая реализация воздействия на трубопровод получается с учетом взаимного влияния и сочетаемости нагрузок и воздействий различного происхождения. Для каждой реализации нагрузок и воздействий определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) в опасных сечениях ЛЧМТ. Обработка полученных данных проводится общепринятыми статистическими методами. Расчеты показывают, что для достоверного определения моментных характеристик до четвертого порядка включительно достаточно шестисот реализаций.

Параметры, характеризующие область допустимых состояний Ω_0 , являются случайными функциями времени, а с учетом их изменения из-за влияния условий эксплуатации – нестационарными. Поэтому при оценке надежности конструкции необходима информация о том, как

влияют условия эксплуатации и технологические факторы на эти параметры. Границы области Ω_0 устанавливаются экспериментальным путем с использованием методов теории планирования эксперимента.

В процессе эксплуатации трубопровода вследствие воздействия условий эксплуатации, которые характеризуются температурой, давлением, коррозионными факторами, насыщением материала конструкции элементами транспортируемого продукта (водород, сера и т.д.), происходит изменение границы области Ω_0 со временем.

Положение границы зависит от конструктивно-технологических факторов: режимов сварки, термообработки и т.д. Параметры, определяющие границу области допустимых состояний – временное сопротивление S_σ , предел текучести S_T , критическое напряжение $S_{кр}$, коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} или J_{Ic} , скорость роста трещин

Р и с. 2. Схема прогнозирования надежности и безопасности трубопроводов

$\left(\frac{d1}{dN}\right)_c$, имеют стохастическую природу. В связи с этим граница области Ω_0 представляет собой случайную функцию времени.

В настоящее время существуют два самостоятельных расчета элементов конструкции: на выносливость и прочность. Первый из них – это прогнозирование постепенных отказов в результате длительного действия на конструкцию нагрузок резкого уровня. Второй – прогнозирование внезапных отказов под действием максимальных нагрузок, возникающих при неблагоприятных, но вполне реальных условиях и режимах работы конструкции. Этот вид отказов не связывают (или слабо связывают) с продолжительностью работы конструкции.

При наличии в конструкции начальных металлургических и технологических дефектов (трещин, пор, включений, скоплений дислокаций, расслоений, несплошностей), конструктивных включений, а также при образовании трещин по мере накопления эксплуатационных повреждений (циклических, коррозионных, эрозийных, от деформационного старения) необходимо производить оценку сопротивления разрушению конструкции на основе энергетических, силовых и деформационных критериев.

Для определения вероятности безотказной работы при внезапном отказе $H_g(t)$ рассматривается выброс случайного процесса изменения напряжений S , коэффициента интенсивности напряжений K , величины J -интеграла за стохастический уровень $(S_T, S_B, K_{1c}, J_{1c})$, который из-за влияния условий эксплуатации имеет нестационарный характер.

При постепенном отказе функция надежности $H_{II}(t)$ вычисляется с использованием кумулятивных моделей, согласно которым основные характеристики поведения системы (длина трещины l , скорость роста усталостной трещины $d1/dN$) квазимоноotonно приближаются к границе допустимой области $[1c, (d1/dN)_c]$.

Ниже применительно к схеме, показанной на рис. 2, рассмотрены формализации некоторых основных критериев предельных состояний.

Критерий предельных напряжений для элемента конструкции, не имеющего и не допускающего появления трещин при внезапном отказе:

$$S_{экр}(t) < S_{np}.$$

Здесь за параметры качества системы принимаются нормальные S и касательные t напряжения. С учетом этих напряжений по одной из теорий прочности определяются эквивалентные напряжения $S_{экр}$.

В качестве предельного уровня напряжений принимаются

$$S_{np}(t) = S_B(t); S_{np}(t) = S_{кр}(t); S_{np}(t) = S_T(t).$$

Функции надежности при внезапном отказе имеют вид

$$H(t) = P[S(t) < S_{np}(t)]. \quad (2)$$

За постепенный отказ элементов конструкции, не имеющих дефектов и не допускающих повреждений, за параметр системы $n(t)$ принимается длина усталостной трещины $l(t)$. Для неповрежденного элемента этот параметр равен нулю, для разрушенного элемента $-l_0$.

Функция надежности при постепенном отказе запишется в виде

$$H(t) = P[l(t) < l_0]. \quad (3)$$

За параметр состояния при внезапном отказе конструкции, имеющей повреждения, принимается один из критериев механики разрушения: коэффициент интенсивности напряжений K , раскрытие вершины трещины d ; J -интеграл. Тогда границы области Ω_0 определяются характеристиками трещиностойкости K_{1c}, Ω_c, J_{1c} . На основании условия безотказной работы функция надежности может принять вид

$$H(t) = P[J(t) < J_{1c}(t)]. \quad (4)$$

Условие безотказной работы конструкции при постепенном отказе и при наличии повреждения записывается в виде

$$\left(\frac{d1}{dN}\right)(t) < \left(\frac{d1}{dN}\right)_c. \quad (5)$$

Здесь $\frac{dl}{dN}$ - скорость роста усталостной трещины, которая принята за параметр качества системы $n(t)$, а $\left(\frac{dl}{dN}\right)$ - предельное значение скорости. Функция надежности при постепенном отказе для элементов конструкции, допускающей появление дефекта, запишется в виде

$$H(t) = P\left[\left(\frac{dl}{dN}\right)(t) < \left(\frac{dl}{dN}\right); 0 \leq t \leq t\right]. \quad (6)$$

Граница области допустимого состояния $\left(\frac{dl}{dN}\right)$ имеет стохастический характер и зависит от условий окружающей среды в процессе эксплуатации конструкции.

Согласно разработанной методике функция надежности при постепенном отказе для элементов конструкции, допускающих развитие трещин, определяется с использованием пошагового принципа.

Надежность всей конструкции может быть рассчитана по формуле модели цепи:

$$\frac{1}{H(t)} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{H_i(t)} - (m-1), \quad (7)$$

где $H_i(t)$ - надежность i -го элемента.

Изложенной методологией целесообразно пользоваться при оценке эффективности конструкторско-технологических решений. Согласно этой методологии предпочтение нужно отдать тем вариантам решений, которые соответствуют наиболее высоким уровням надежности. В этом случае вероятность того, что отказ с серьезными последствиями произойдет в течение планируемого срока службы создаваемой конструкции трубопроводных систем, будет минимальной.

К числу конструктивно-технологических мероприятий, позволяющих повысить уровень надежности на этапе проектирования, следует отнести: выбор материала; назначение технологических режимов сварки, термообработки; обеспечение средств коррозионной защиты участков ЛЧМТ; выбор радиуса искривленной части ЛЧМТ; изменение толщины стенки трубопровода; рациональное конструктивное оформление сопряжений различных частей трубопровода; гашение волновых процессов в трубопроводах; снижение уровня вибраций.

Основными из современных средств гашения волновых процессов в трубопроводных системах являются стабилизаторы давления [6]. Они созданы на базе наукоемких технологий, разработанных на ракетно-космических и авиационных предприятиях. Принцип их работы основан на распределенном по длине трубопровода диссипативном и упругодемпфирующем воздействии на поток перекачиваемой среды. Наибольший эффект гашения достигается при диссипации энергии пульсаций на перфорационных отверстиях, равномерно распределенных по

Р и с. 3. Типовая схема стабилизатора давления:

- 1 - упругий наполнитель (газ, резина);
- 2 - перфорированный трубопровод;
- 3 - корпус стабилизатора давления;
- 4 - разделительный упругий элемент

длине стабилизатора, а также вследствие демпфирования, обусловленного податливостью упругих элементов стабилизатора, выполненных в виде газовой подушки, камер и сильфонов со стенками из пружинистых и эластичных материалов.

Дополнительные эффекты гашения обеспечиваются при расширении потока в предкамерах и коллекторах стабилизатора, созданием однонаправленного движения, т.е. в результате влияния на геометрию потока. Особенностью стабилизатора давления является то, что он не нарушает формы трубопровода и имеет минимальное гидравлическое сопротивление. Наибольшее распространение получила конструктивная схема стабилизатора в виде участка трубопровода с равномерно распределенной перфорацией, через которую перекачиваемая среда может перетекать из трубопровода в демпфи-

рующую надстройку над перфорированной его частью. На рис. 3 дана типовая схема стабилизатора давления.

Таким образом, в общем случае, стабилизатор давления как специальное включение в трубопроводную систему должен препятствовать распространению возмущения среды вследствие упругодемпфирующего воздействия на поток, приводящего к перераспределению энергии в спектре колебаний, и механического воздействия, вызывающего необратимые потери этой энергии. На рис. 4 представлена типовая диаграмма гашения гидроударов и пульсаций стабилизатором давления.

Стабилизаторы давления являются высокоэффективными устройствами для защиты от разрушений трубопроводных систем добычи и транспортировки нефти и газа, поддержания пластового давления и закачки раствора в пласт, слива и налива нефти и нефтепродуктов.

Широкий класс стабилизаторов давления для защиты трубопроводов $\varnothing 10 \dots 1200$ мм при рабочих давлениях до 26 МПа разработан на базе наукоемких технологий, заимствованных из ракетно-космической техники. Будучи конструктивно простыми, технологичными при изготовлении и монтаже, предлагаемые стабилизаторы обеспечивают гарантированное снижение уровня пульсаций в трубопроводных системах в 8...10 раз, могут применяться при всех типоразмерах трубопроводов в широком диапазоне рабочего давления, повышая их надежность и долговечность. Они могут быть внедрены и использованы в магистральных добычи и транспортировки нефти, нефтепродуктов и газа, а также в системах коммунального и промышленного водоснабжения.

Р и с. 4. Типовая диаграмма гашения гидроударов и пульсаций стабилизатором давления:
а – без стабилизатора; б – со стабилизатором

Уровень надежности и ресурс конструкций трубопроводных систем зависят от их вибросостояния. Высокий уровень вибраций может привести к усталостным разрушениям, к разгерметизации трубопровода и к аварийной ситуации. Наиболее нагруженными являются пусковые газопроводы газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций на режимах пуска, останова и при перегрузках.

В работе [7] приводятся данные о применении виброгасителей из металлорезины (МР), разработанной в Куйбышевском авиационном институте (ныне Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П.Королева) несколько десятилетий назад. Виброгаситель из МР представляет собой однородную массу, получаемую холодным прессованием заготовки, которая изготавливается из дозированной по массе и специальным образом намотанной тонкой, предварительно растянутой проволоочной спирали (в нашем случае материал проволоочной спирали – нержавеющая сталь). Развитая поверхность контакта между спиралями в единице объема виброгасителя обеспечивает большую работу трения при его деформации, таким образом, виброгаситель является вязкоупругим элементом с гистерезисной петлей большой площади в координатах внешняя нагрузка – деформация [8, 9]. Если виброгаситель одной частью своей поверхности контактирует с элементом конструкции, испытывающим вибрации, а другой частью – с неподвижным элементом конструкции, то возникающие периодические деформации виброгасителя диссипируют энергию механических колебаний в тепло и уровень вибрации снижается [8 – 10].

Выбор оптимальных виброгасителей из МР для снижения вибраций в условиях статических и динамических нагрузок газопроводов проводился на модельных экспериментах на вибростенде. Исследования показали, что в диапазоне частот 10-400 Гц наилучшими вибропоглощающими свойствами обладает виброгаситель с пористостью $\Pi = 75\%$ (здесь $\Pi = 1 - \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{м}}$, где $\rho_{\text{м}}$ – плотность металла проволоки, из которой сделан виброгаситель; $\rho_{\text{в}}$ – плотность виб-

рогасителя).

Разработанные на основе МР виброгасители устанавливались на участке пускового газопровода. Они позволили снизить уровень вибраций в 6 раз [7].

При реализации конструктивно-технологических и технических средств обеспечения надежности и ресурса трубопроводных систем необходимо учитывать не только технические показатели, но и экономические.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ганиев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий в трубопроводах. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1996. 258 с.
2. Протасов В.Ф., Молчанов А.В.. Экология, здоровье и природопользование в России. М.: Финансы и экономика, 1995. 523 с.
3. Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. 155 с.
4. Тарасов Ю.Л., Миноранский Э.И., Дуплякин В.М. Надежность элементов конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1992. 223 с.
5. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 447 с.
6. Анишаков Г.П., Низамов Х.Н., Тарасов Ю.Л. и др. Стабилизация давления – средство повышения ресурса и надежности трубопроводных систем // Прочность и надежность нефтегазового оборудования: Докл. 2-го межотраслевого семинара. М. 2001.
7. Никишкин В.И., Посягин Б.С. и др. Снижение уровня вибрации газопроводов виброгасителями из металлорезины // Безопасность трубопроводов: Докл. участников Междунар. конф. Ч. 1. М. 1995. С. 306-314.
8. Сойфер А.М. О расчетной модели материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов // Тр. КуАИ. Куйбышев: КуАИ, 1967. Вып. XXX.
9. Жирнов А.Ф., Панин Е.А. Исследование упругодемпфирующих опор трубопроводов с прокладками из материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Межвуз. сб. науч. тр. Куйбышев: КуАИ, 1975. Вып. 1 (68). С. 65-69.
10. Бузицкий В.И., Сойфер А.М. Цельнометаллические упругодемпфирующие элементы, их изготовление и применение // Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей: Тр. КуАИ. Куйбышев: КуАИ, 1965. Вып. XIX.

Поступила 12.03.2003 г.