

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

© 2003 Ю. Л. Тарасов, С. Н. Перов, С. Л. Логвинов

Самарский государственный аэрокосмический университет

В научно-исследовательских подразделениях Самарского государственного аэрокосмического университета накоплен богатый опыт обеспечения надежности и определения безопасного срока службы силовых элементов конструкций летательных аппаратов.

В настоящей статье в виде распространения этого опыта предлагается описание методики оценки вероятности безотказной работы трубопроводных систем различного назначения, а также описываются конструктивные мероприятия, позволяющие существенно снизить эксплуатационные нагрузки и повысить надежность и долговечность.

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 [1].

В работе предложены методы оценки надежности принятых конструктивно-технологических решений при проектировании элементов трубопроводных систем с учетом реальных условий эксплуатации. Согласно предложенной методике оценка вероятности безотказной работы осуществляется 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 стороны.

При этом анализируется прочностная надежность силовых 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 $v(\tau)$ в заданной области Ω_0 в течение требуемого времени t [2]:

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

Вычислению функции надежности предшествуют три этапа: схематизация системы и внешнего воздействия, решение задачи статистической динамики, выбор области допустимых состояний Ω_0 . Общая схема оценки надежности конструкции представлена на рис. 1.

На этой схеме показано, что при расчете надежности конструкции как сложной системы учитывается возможность постепенных отказов в результате длительного действия на конструкцию нагрузок переменного уровня и внезапных отказов при действии максимальных нагрузок и режимов работы конструкции.

Это учитывается путем схематизации элемента конструкции в виде модели из двух последовательно соединенных фиктивных элементов, под которыми подразумевается реальный силовой элемент, имеющий лишь один вид отказа – внезапный или постепенный. При рассмотрении конструктивной схемы конкретной трубопроводной системы необходимо провести структурный анализ, при котором трубопровод рассматривается как протяженная система, состоящая из однородных участков (по способу прокладки, по грунтово-геологическим, климатическим и эксплуатационным условиям).

Схематизация конструкции трубопроводной системы представлена на рис. 2.

Задача статистической динамики для линейной части магистрального трубопровода (ЛЧМТ) решается с учетом того, что тру-



Рис. 1. Схема оценки надежности конструкции

бопровод во время эксплуатации испытывает нагрузки и воздействия, которые, в общем случае, представляют собой случайные пространственно-временные функции. Расчетные нагрузки и воздействия на конструкцию трубопровода регламентируются Строительными Нормами и Правилами (СНиП). Учитывая продолжительность сроков эксплуатации трубопроводов и высокую изменчивость нагрузок и воздействий, исходную информацию о нагрузках и воздействиях представим с учетом фактора времени.

Нагрузки и воздействия на трубопровод условно можно разделить на две группы – функциональные и природно-климатические. Данные о типах и уровнях функциональных нагрузок (внутреннем давлении перекачиваемого продукта, регулируемых температурных воздействиях и др.) необходимо принимать в соответствии с проектной документацией и имеющимися статистическими дан-

ными. 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 давления, 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 смеж-

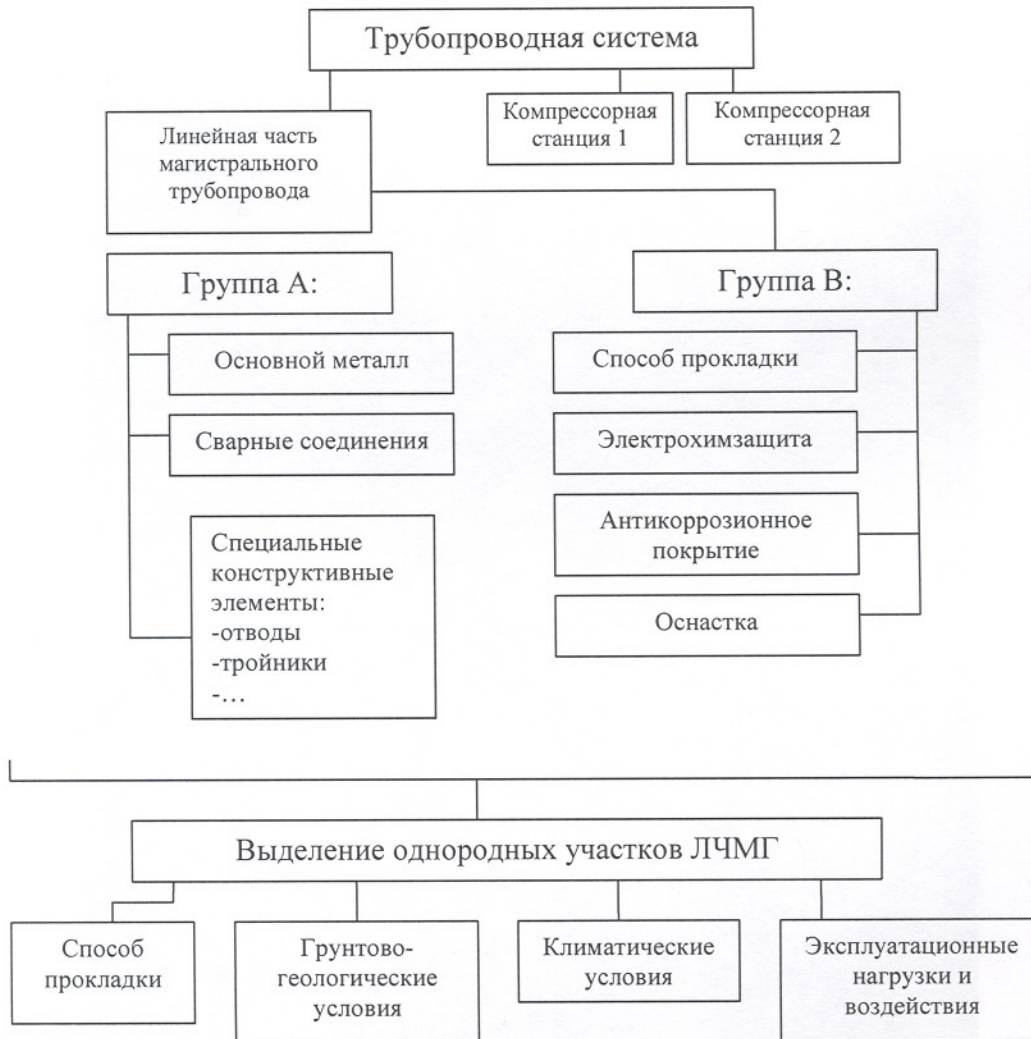


Рис. 2. Схематизация конструкции

ные 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.

Параметры природно-климатических нагрузок задаются на основе анализа принятых конструктивных и технологических решений, информации о трассе трубопровода, включающей основные природно-климатические характеристики регионов и физические, механические и математические модели рассматриваемых явлений.

Нагрузки для подземных частей трубопроводов:

- внутреннее давление перекачиваемого продукта;
- температурные нагрузки, вызванные несовпадением эксплуатационной температуры

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 несовпадением 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 практически не реализуемым, 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.

Для оценки надежности необходима информация о том, как влияют условия эксплуатации и конструктивно-технологические факторы на положение границ области допустимых состояний Ω_0 . Информация о влиянии условий эксплуатации (коррозия, нагрев, охлаждение и др.) и конструктивно-технологических факторов (виды сварки, термообработки и др.) на характеристики конструкционных материалов необходима также для обоснованного выбора материалов при проектировании. Это является основой обеспечения заданного уровня надежности.

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 (водорода, серы и т. д.) происходит изменение границы области Ω_0 со временем.

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 связан или слабо связан с продолжительностью работы конструкции.

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

При постепенном отказе функции надежности $H_n(t)$ вычисляются с использованием кумулятивных моделей, согласно которым основные характеристики поведения системы (длина трещины l , скорость роста усталостной трещины $d l/dN$) квазимонотонно приближаются к границе допустимой области $[l_c, (d l/dN)_c]$.

Ниже применительно к схеме, представленной на рис. 3, рассмотрена формализация некоторых основных критериев предельных состояний.

Для элемента конструкции, не имеющего и не допускающего появления трещин при внезапном отказе, за параметры качества системы принимается эквивалентное напряжение $\sigma_{экв}(t)$, определяемое по одной из теорий прочности по значениям нормальных σ и касательных τ напряжений.

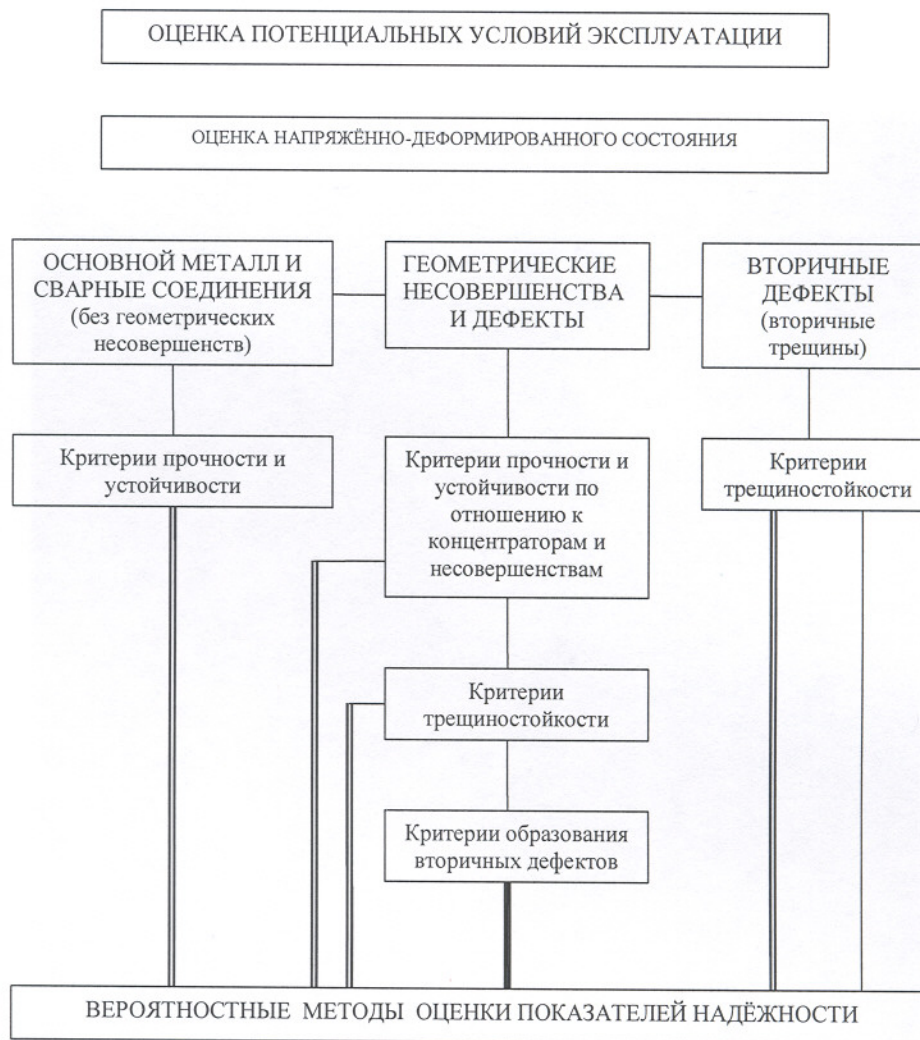


Рис. 3. Схема оценки показателей надежности трубопроводов

В качестве предельного уровня напряжений принимаются

$$\sigma_{np}(t) = \sigma_s(t),$$

$$\sigma_{np}(t) = \sigma_{кр}(t),$$

$$\sigma_{np}(t) = \sigma_T(t).$$

Функции надежности при внезапном отказе здесь имеют вид

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

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

Функция надежности при постепенном отказе запишется в виде

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

За параметр состояния при внезапном отказе конструкции, имеющей повреждения, принимается один из критериев механики разрушения: коэффициент интенсивности напряжений K , раскрытие вершины трещины δ , J -интеграл. Тогда границы области Ω_0 определяются характеристиками трещиностойкости K_{1c}, Ω_c, J_{1c} .

На основании условия безотказной работы функция надежности имеет вид

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

Условие безотказной работы конструкции при постепенном отказе и при наличии

повреждения записывается в виде

$$\left(\frac{dl}{dN}\right)(\tau) < \left(\frac{dl}{dN}\right)_c. \quad (5)$$

Здесь $\frac{dl}{dN}$ - скорость роста усталостной трещины, которая принята за параметр качества системы $v(\tau)$, $\left(\frac{dl}{dN}\right)_c$ - предельное значение скорости.

Функция надежности при постепенном отказе для элементов конструкции, допускающей появление дефекта, запишется в виде

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

Граница области допустимого состояния $\left(\frac{dl}{dN}\right)_c$ 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, m - количество элементов цепи.

Применение предлагаемых методик на этапе проектирования дает возможность обнаружить силовые элементы конструкции с наименьшим уровнем надежности. Кроме того, эти методики позволяют определять нагрузки, действующие на отдельные части конструкции, предельные значения размеров трещин или скорости их распространения в соответствии с заданным уровнем надежности, прогнозировать остаточный ресурс конструкции ЛЧМГ.

Обеспечение надежности и ресурса на этапе проектирования реализуется путем выбора материала элементов конструкции, выбора рациональных конструктивных форм, а также назначением средств защиты от коррозионных воздействий, назначением технологических способов производства, а в случае необходимости принимается решение об использовании средств стабилизации давления в трубопроводных системах [3, 4].

Основными из современных средств гашения волновых процессов в трубопроводных системах являются стабилизаторы давления. 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 длине стабилизатора. Гашение реализуется также вследствие демпфирования, обусловленного податливостью упругих элементов стабилизатора, выполненных в виде газовой подушки, камер и сильфонов со стенками из пружинистых и эластичных материалов.

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 демпфирующую надстройку над перфорированной его частью. На рис. 4 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. 5

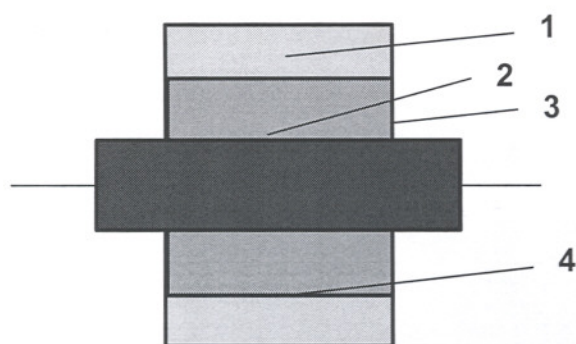


Рис. 4. Типовая схема стабилизатора давления
 1 - упругий наполнитель (газ, резина),
 2 - перфорированный трубопровод,
 3 - корпус стабилизатора давления,
 4 - разделительный упругий элемент

представлена типовая диаграмма гашения гидроударов и пульсаций стабилизации 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.

Аварийные ситуации возникают также при работе трубопроводных систем водоснабжения, теплоснабжения. Возникают они при запуске насосных станций на закрытую задвижку, срабатывании обратных клапанов, включении и выключении задвижек в линейной части трубопроводной системы, аварийном отключении электропитания, вызывающем остановку насосных станций.

В системах теплоснабжения теплоноситель перекачивается по замкнутому контуру,

поэтому авария на одной насосной станции служит причиной распространения гидроудара по всей трубопроводной сети.

Вибрационные нагрузки увеличивают темпы износа инженерных сетей. В настоящее время их ветхость служит причиной каждой второй аварии на объектах теплоснабжения и каждой третьей на объектах водоснабжения и канализации [5].

В целом на водопроводных сетях ежегодно происходит около 75 тыс. прорывов, отключений и аварий, что сопровождается потерями воды в объеме 10 %...20 %. Износ действующих в России систем водоснабжения превышает 40 % и нарастает с каждым годом – более 1/3 всех водопроводных сетей требует полной замены [4].

Стабилизаторы позволяют существенно снизить динамические нагрузки, действующие на трубопровод и установки, повысить их надежность, долговечность и обеспечить их защиту от разрушений.

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.

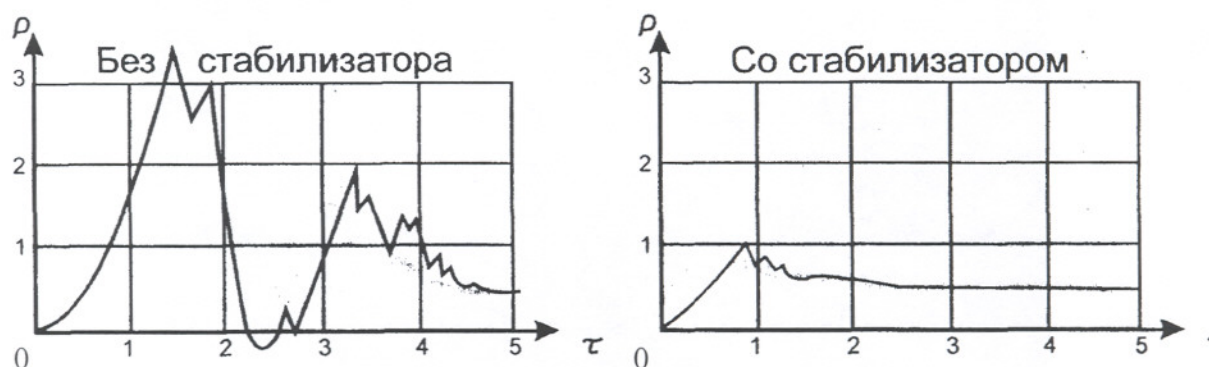


Рис. 5. Типовая диаграмма гашения гидроударов и пульсаций стабилизатором давления:
 P , МПа – давление; τ , с – время

Они могут быть внедрены и использованы в магистральных добычи и транспортировки нефти, нефтепродуктов и газа, а также в системах коммунального и промышленного водоснабжения.

Стабилизаторы давления, являясь механическими системами, надежны в работе, конструктивно просты, технологичны при изготовлении и монтаже. Подобные устройства могут применяться при всех типоразмерах трубопроводов ($\varnothing 10...1200$ мм) в широком диапазоне рабочего давления (до 16 МПа).

Стабилизаторы давления позволяют значительно снизить динамические нагрузки, действующие на существующие трубопроводы и установки, повысить их надежность, долговечность, защитить их от разрушения, а также обеспечить необходимый ресурс и надежность на вновь создаваемых трубопроводах.

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 [6] приводятся данные о применении виброгасителей из металлорезины (МР), разработанной в Куйбышевском авиационном институте (ныне Самарский государственный аэрокосмический университет) несколько десятилетий назад.

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 $\Pi = 1 - \rho_B / \rho_M$, где ρ_M – плотность металла проволоки, из которой сделан виброгаситель; ρ_B – плотность виброгасителя).

Разработанные на основе МР виброгасители устанавливались на участке пусково-

го газопровода. Они позволили снизить уровень вибраций в 6 раз [7].

Изложенная методика оценки вероятности безотказной работы силовых элементов конструкций, разработанная применительно к конструкциям летательных аппаратов и адаптированная к трубопроводным системам, позволит существенно повысить качество проектных разработок и их экономическую эффективность. Использование стабилизаторов давления и вибродемпфирующих опор с виброгасителями из металлорезины позволит существенно снизить уровень эксплуатационных нагрузок, повысить показатели надежности, увеличить долговечность трубопроводных систем.

Список литературы

1. Тарасов Ю. Л., Миноранский Э. И., Дуплякин В. М. Надежность элементов конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1992. - 223 с.
2. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение. 1990. - 447 с.
3. Аншаков Г. П., Низамов Х. Н., Тарасов Ю. Л. и др. Стабилизация давления – средство повышения ресурса и надежности трубопроводных систем. Доклады 2-го межотраслевого семинара «Прочность и надежность нефтегазового оборудования». Москва, 2001.
4. 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.
5. Протасов В. Ф., Молчанов А. В. Экология, здоровье и природопользование в России. М.: Финансы и экономика. 1995. - 523 с.
6. Никишкин В. И., Посягин Б. С. и др. Снижение уровня вибрации газопроводов виброгасителями из металлорезины. В кн.: Доклады участников Международной конференции «Безопасность трубопроводов», ч. 1, Москва. 1995, с. 306-314.
7. Никишкин В. И., Посягин Б. С. и др. Снижение уровня вибрации газопроводов виброгасителями из металлорезины. В кн.: Доклады участников международной конференции «Безопасность трубопроводов», ч. 1, Москва. 1995, с. 306-314.

**PROCEDURE OF ESTIMATING PROBABILITY OF PIPELINE SYSTEM
RELIABLE OPERATION**

© 2003 Ju. L. Tarassov, S. N. Perov, S. L. Logvinov

Samara State Aerospace University

Scientific departments and laboratories of Samara State Aerospace University have wide experience in ensuring reliability and defining safe life expectancy of aircraft structural elements. The paper provides the description of the procedure of estimating probability of reliable operation of different purpose pipeline systems. Measures permitting considerable reduction of operation loads and increase of reliability and durability are also described.