



Research Article

Received: April 6, 2021

Accepted: July 2, 2021

Published: July 26, 2021

ISSN 2658-5553

Durability and Performance of Composite Pipes Under Conditions of Exposure to high Temperatures of the Transported Liquid

Malikov, Denis Anatolievich^{1*} 
 Vasyutkin, Evgeny Sergeevich² 
 Burin, Dmitriy Leonidovich³ 
 Dzhahalov, Andrei Igorevich⁴ 
 Ismailov, Aleksei Marlenovich⁵ 
 Kovalev, Mark Andreevich⁵ 
 Tokarev, Vasilij Olegovich⁵ 
 Birryukov, Dmitriy Vladimirovich⁶ 

¹ Institute of Architecture and Construction, Department of Building Constructions and Structures, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; malikovda@bk.ru

² CEO Composite Technology & Equipment, Balashiha, Moscow region, Russian Federation;

³ St. Petersburg Metro, St. Petersburg, Russian Federation;

⁴ St. Petersburg Housing Committee, Saint-Petersburg, Russian Federation;

⁵ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

⁶ Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khruleva, St. Petersburg, Russian Federation

Correspondence:* email malikovda@bk.ru; contact phone [+79124701619](tel:+79124701619)

Keywords:

Polymer, Fiberglass, Composite pipes, Heat load, Durability, Working capacity, Safety factor

Abstract:

The durability and serviceability of composite pipes under thermal and power influences (loads, strains) determine the safety factor for their calculation. Determination of the safety factor is reduced to the decision of deformations from thermal and force effects, at which the probability of failure will be maximum. This paper proposes determining the safety factor of composite pipes subjected to thermal and power loads. The safety factor serves as a measure of the mechanical reliability of composite pipes. It is a statistical value determined by probabilistic calculation methods, particularly the ratio of the mathematical expectation of the strength criterion to the mathematical expectation of the destructive factor's value. The technique has been successfully tested (proved) for composite pipes for hot and cold-water supplies using various polymers.

1 Introduction

Исследования долговечности и их сохраняемости в условиях воздействия высоких температур воды изложены, в частности, в работах [1–9].

Также результаты экспериментально-теоретических исследований связанных с долговечностью композитных труб, эксплуатируемых при различных температурах, представлены в работах [10–25].

В работе [26] разработан аналитический метод исследования предела прочности композитных труб под действием внутреннего давления. Такой аналитический метод считается простым, быстрым и точным по сравнению с другими аналитическими и численными методами. После влияния случайных факторов проектных нагрузок на поведение трубы предел прочности количественно оценивается с помощью вероятностного анализа. Проведя обзор литературы, можно увидеть, что данный подход не учитывает ряд факторов, а именно температуры и времени



воздействия. Кроме того, отсутствие коэффициентов запаса прочности для различных видов композитных труб ограничивают их область применения.

Представленные исследования направлены на создание усовершенствованной расчетной методики определения коэффициентов запаса прочности, учитывающей температурный и временной факторы, а также давление при эксплуатации различных видов композитных труб

Объектом исследования в конструкции композитных труб является стеклопластиковый материал, выполненный из волокон алюмоборосиликатного стекла марки «Е» и модифицированного эпоксидного связующего.

Предметом настоящего исследования является коэффициент запаса прочности для различных видов композитных труб при эксплуатационных воздействиях.

Исследование включает в себя несколько задач:

- Экспериментальное исследование образцов композитных труб при эксплуатационных воздействиях во время действия следующих факторов - температуры, давления и времени;
- Разработка и апробация методики определения коэффициентов запаса прочности и давления опрессовки композитных труб на основе полученных результатов испытаний;
- Определение необходимых коэффициентов запаса прочности для различных видов композитных труб.

2 Materials and Methods

2.1 Зависимости прочности полимерных композитных материалов от температуры транспортируемой среды

Многолетние результаты исследований механических свойств стеклопластиков при повышенных и пониженных температурах показывают, что с повышением температуры наблюдается значительное падение прочности [26]. Так, например, для стеклопластика, изготовленного методом намотки на основе эпоксидного связующего с ангидридным отвердителем, установлено, что понижение прочности при температуре +40 и +60°C достигает соответственно 10 и 28%. Снижение продольного модуля упругости при этих температурах менее существенно и составляет соответственно 3 и 9%.

При этом важно отметить, что снижение наиболее значимого для надежности работы трубопровода параметра - давления разгерметизации - происходит медленнее, чем снижение прочностных показателей полимерных композитных материалов, т.к. при увеличении температуры эксплуатации композитных труб несколько повышается относительное удлинение связующего. Этот фактор уменьшает вероятность образования трещин в полимерной матрице и частично компенсирует увеличение деформаций за счет снижения жесткости материала.

Влияние температуры на прочность и жесткость конструкций из полимерных композитных материалов особенно проявляется при ее длительном воздействии, причем скорость старения существенно возрастает с увеличением температуры.

Рис.1 демонстрирует типичные зависимости предела прочности на растяжение и модуля упругости вдоль нитей основы тканого стеклопластика с эпоксидным связующим при фиксированной температуре временного воздействия 90°C.

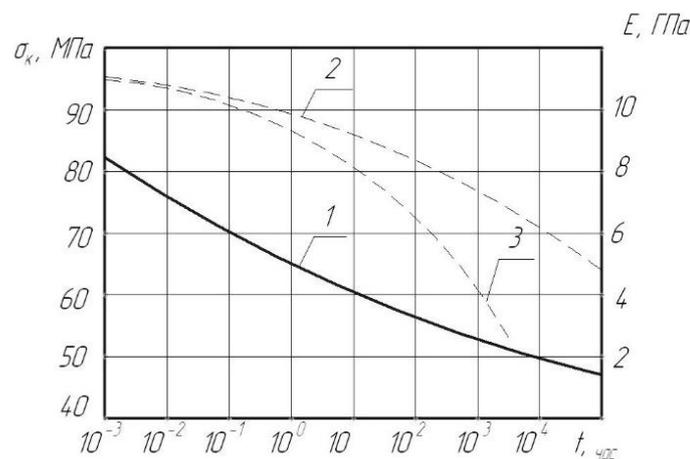


Рис. 1. Зависимость характеристик ПКМ от времени теплового воздействия.

- 1. Предел прочности на растяжение вдоль нитей основы
- 2. Модуль упругости на растяжение вдоль нитей основы при напряжении 25 МПа.
- 3. Модуль упругости на растяжение вдоль нитей основы при напряжении 50 МПа

Fig. 1. Dependence of PCM characteristics on the time of heat exposure

- 1. Tensile strength along the warp threads
- 2. Modulus of elasticity in tension along the warp threads at a stress of 25 MPa.
- 3. Modulus of elasticity in tension along the warp threads at a stress of 50 MPa

С ростом температуры качественный характер этих зависимостей остается, однако кривые смещаются в сторону уменьшения времени теплового воздействия. Этот факт используется при разработке методик ускоренных испытаний. В связи с тем, что обычные испытания композитов на долговечность требуют очень длительных экспериментов, продолжительность их может быть сокращена за счет определенного повышения температуры. Существуют различные методики ускоренных испытаний, в которых прогнозируемая долговечность t_d связана с температурой испытаний T и напряжениями в материале σ экспоненциальными зависимостями типа

$$t_d = a \cdot \exp\left(\frac{b - c\sigma}{T}\right), \quad (1)$$

где b и c это коэффициенты, устанавливаемые по результатам испытаний.

При исследованиях долговечности композитных труб для тепловых сетей задача усложняется тем обстоятельством, что наряду с температурой имеет место длительный контакт с водой, причем вследствие сезонности систем отопления температура воды многократно изменяется от температуры окружающей среды до температуры теплоносителя, а напряжения от нуля до напряжения, обусловленного рабочим давлением.

2.2 Методика исследования теплостойкости композитных труб

Методика испытаний образцов композитных труб основана на комплексном эксплуатационном воздействии факторов температуры, давления и времени (далее – эксплуатационных факторов) воды, находящейся во внутренней полости образцов. После воздействия определенного сочетания эксплуатационных факторов производится оценка потерь несущей способности образцов путем проведения гидравлических испытаний, а также косвенным путем определяется интенсивность гидролитического разложения полимерного связующего.

Для осуществления воздействия эксплуатационных факторов был разработан испытательный стенд, описание которого приводится ниже. Методика испытаний усложняется фактором гидролитической неустойчивости композита, находящегося в контакте с горячей водой под давлением. Этот фактор, имеющий скачкообразный характер взаимодействия от температуры воды, не дает возможности использовать экстраполяцию результатов ускоренных испытаний. Последние проводятся обычно при температуре, превышающей фактическую температуру эксплуатации композитных труб, затем с помощью известных зависимостей производится пересчет долговечности в натуральных условиях. С учетом наличия гидролиза для

получения достоверных результатов требуется использовать максимально возможное приближение испытательных эксплуатационных факторов к натурным условиям и проводить достаточно продолжительные лабораторные и заводские испытания. При этом давление внутри труб выбирается постоянным и равным 1.6 МПа, что достаточно, чтобы не наступало кипение в трубе при температурах испытаний в диапазоне 135...165°C.

На первом этапе производится отбор наиболее перспективного варианта из вновь разработанных связующих с точки зрения его теплостойкости и технологичности. Испытания проводятся для композитных труб с различными вариантами связующих при температурах 140-160°C.

Основной этап испытаний композитных труб проводится на эпоксидном связующем при эксплуатационной температуре (до 135°C) с целью определения их долговечности. Во время проведения испытаний на всех этапах устанавливается работоспособность или отказы исследуемых образцов во время воздействия эксплуатационных факторов. Часть образцов из партии, где зарегистрирован отказ по герметичности, снимается с дальнейших испытаний с испытательного стенда и производится их гидроиспытания с регистрацией давления разгерметизации и сравнения его с исходными значениями. Кроме того, периодически производится анализ химического состава воды, непрерывно сливаемой по каплям из полости последовательно собранных образцов одной партии на предмет установления выделений химических веществ из полимерного связующего.

2.3 Описание экспериментальных образцов и программа их испытаний

В качестве объекта испытаний выбираются экспериментальные образцы, имеющие внутренний диаметр 80 мм, толщину 3 мм и длину 570 мм. Вместе с трубой испытанию подвергается соединительная муфта, установленная на трубу посредством резьбового соединения с уплотнителем. Такое соединение является разъемным и позволит заменять испытываемый образец в процессе испытаний. Кроме того, соединение обладает достаточной прочностью и герметичностью, что с высокой вероятностью обеспечивает отказ конструкции по телу трубы после проведения гидроиспытаний на разрушение.

Стеклопластиковый материал выполнен из волокон алюмоборосиликатного стекла марки «Е» и модифицированного эпоксидного связующего. Лабораторные испытания этого связующего в 2017 году показали, что композитных труб на его основе могут быть использованы при температуре теплоносителя вплоть до 150°C.

Во время испытаний макетные образцы собираются в гирлянды по 3 шт. (рис. 2) и помещаются в отдельную печь. При исследовании образцов задействуют от 2 до 9 печей, то есть, одновременно в испытательном стенде (рис. 3) находятся несколько образцов.



Рис. 2. Гирлянды образцов, подготовленные к испытаниям
Fig. 2. Garlands of samples prepared for testing



Рис. 3. Испытательный стенд
Fig. 3 Test stand

Программа и методика испытаний образцов основана на комплексном эксплуатационном воздействии эксплуатационных факторов воды, находящейся во внутренней полости образцов. После воздействия определенного сочетания эксплуатационных факторов производится оценка потерь несущей способности образцов путем проведения гидравлических испытаний, а также косвенным путем определяется интенсивность гидrolитического разложения полимерного связующего.

Программа испытаний образцов включает в себя следующие этапы работ:

- Испытания трех образцов на гидростенде до разрушения (потеря герметичности) с фиксацией внутреннего давления, соответствующего их разгерметизации.
- Воздействие эксплуатационных факторов воды в течение 1500 часов. Допускается проводить испытания одиночными циклами продолжительностью каждого из них не менее 120 часов (5 суток непрерывного воздействия). При этом внутри образцов устанавливается температура 155°C и давление 2.5 МПа.
- После полного цикла испытаний из каждой гирлянды отбираются по одному образцу, и они вновь подвергаются гидроразрушению на стенде с фиксацией давления разгерметизации.

2.4 Описание испытательного стенда

Исследование долговечности макетных образцов с воздействием долговременного воздействия эксплуатационных факторов в контакте образцов труб с водой производится с помощью испытательного стенда (рис. 4). Испытательный стенд включает в себя следующие основные системы: нагрева вода, подачи и слива воды, аварийного выключения, пульта управления и регистрации параметров.

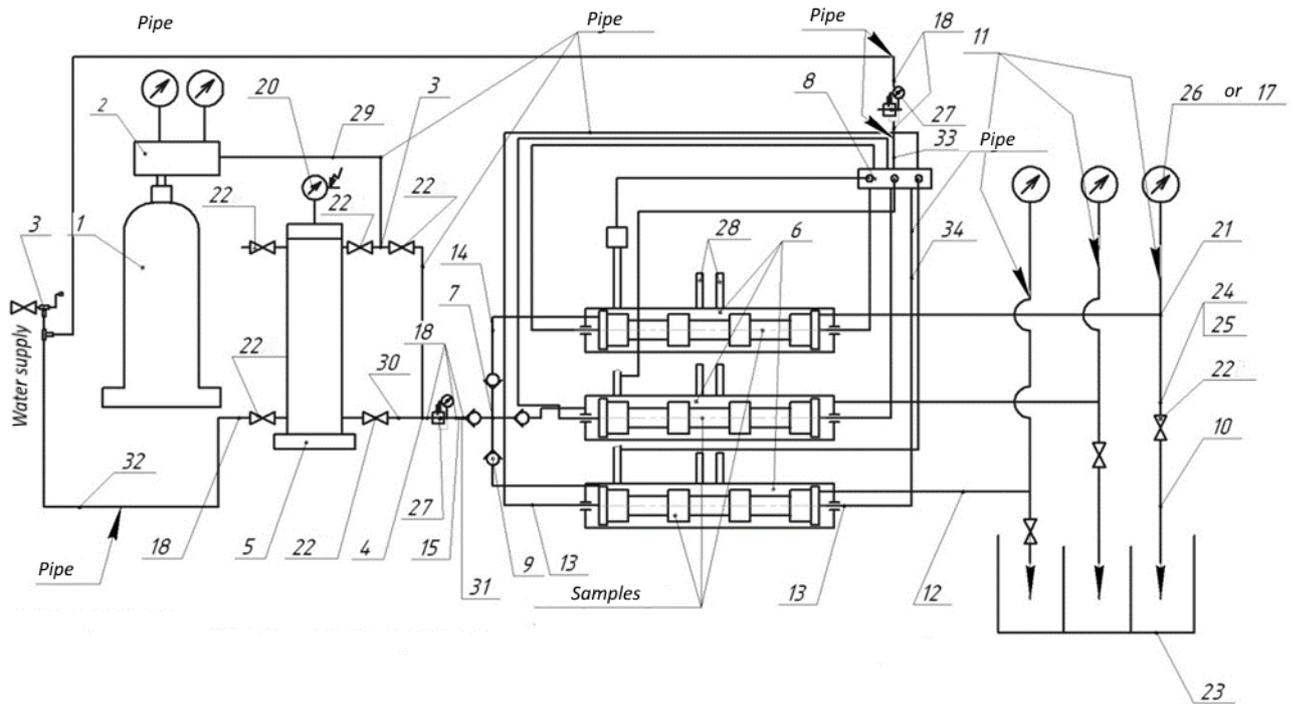


Рис. 4. Схема испытательного стенда

- 1 - Баллон со сжатым воздухом;
- 2 - Редуктор
- 3, 4 - Тройник;
- 5 - Демпфер;
- 6 - Печь;
- 7, 8 - Гребенка;
- 9 - Клапан обратный;
- 10 - Жиклер;
- 11 - Трубопровод;
- 12 - Трубопровод;
- 13 - Трубопровод;
- 14 - Трубопровод;
- 15 - Муфта 1/2";
- 16 - Пробка;
- 17 - Заглушка;
- 18 - Штуцер;
- 19 - Переходник;
- 20 - Манометр электроконтактный;
- 21 - Тройник;
- 22 - Кран шаровой;
- 23 - Емкость;
- 24 - Сгон 1/2";
- 25 - Контргайка 1/2";
- 26 - Манометр;
- 27 - Электроклапан;
- 28 - Термопары.

Fig. 4. Scheme of the test bench

- 1 - Compressed air cylinder;
- 2 - Reducer;
- 3, 4 - Tee;
- 5 - Damper;
- 6 - Oven;
- 7, 8 - Comb;
- 9 - Check valve;
- 10 - Jet;
- 11 - Pipeline;
- 12 - Pipeline;
- 13 - Pipeline;
- 14 - Pipeline;
- 15 - 1/2 "clutch;
- 16 - Cork;
- 17 - Plug;
- 18 - Fitting;
- 19 - Adapter;
- 20 - Electrocontact manometer;
- 21 - Tee;
- 22 - Ball valve;
- 23 - Capacity;
- 24 - Squeeze 1/2 ";
- 25 - 1/2 "Locknut;
- 26 - Manometer;
- 27 - Electrovalve;
- 28 - Thermocouples.

3 Results and Discussion

Испытания начаты в апреле 2017 г. и продолжаются до настоящего времени. Через каждые 6 месяцев (в дальнейшем период времени может быть увеличен) одна из гирлянд снимается со стенда, и образцы подвергаются гидроиспытаниям до разгерметизации. Образцы, отобранные для проведения гидроиспытаний, заменяются новыми образцами. В результате испытаний за 3 года накоплена определенная информация по изменению несущей способности композитных

труб (давления разгерметизации) после длительного воздействия давления и температуры воды (рис. 5).

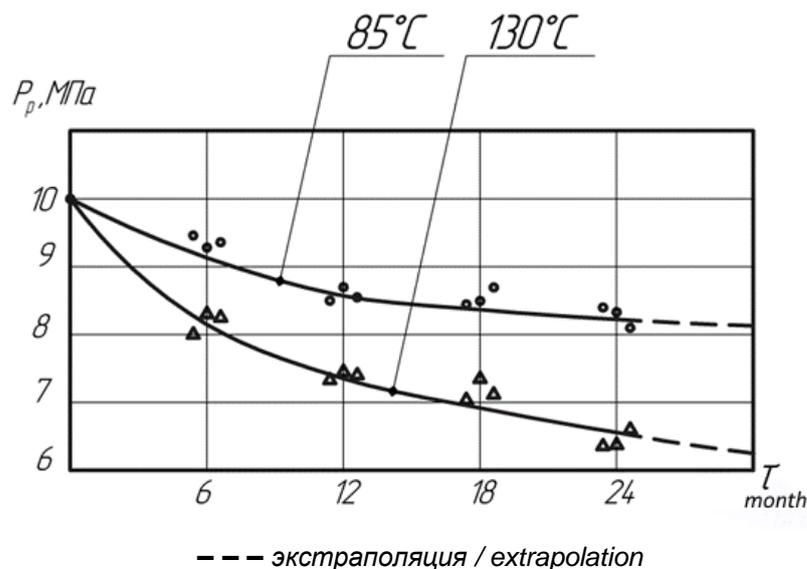


Рис. 5. Изменение давления разгерметизации от длительности испытаний
Fig. 5 Change in depressurization pressure from the duration of tests

Связь давления разгерметизации от времени контакта с горячей водой аппроксимировалась степенной зависимостью вида

$$t_d = a \cdot \exp\left(\frac{b - c\sigma}{T}\right), \quad (1)$$

$$P_p = P_{po} \tau^\alpha \quad (2)$$

где P_{po} – среднее значение давления разгерметизации при кратковременном нагружении;

τ – длительность контакта с горячей водой [мес.];

α – показатели степени аппроксимирующей зависимости. В результате обработки экспериментальных данных получены следующие пары значений $T = 85^\circ C$ $\alpha = 0.06$, $T = 130^\circ C$ $\alpha = 0.13$.

С помощью зависимости путем экстраполяции произведена оценка потери несущей способности композитных труб после 30 лет эксплуатации в контакте с горячей водой. При температуре $85^\circ C$ прогнозируется снижение давления разгерметизации примерно на 40%, при температуре $130^\circ C$ прогнозируется снижение давления разгерметизации примерно на 65%.

Коэффициент запаса прочности η служит мерой механической надежности конструкции. Он является статистической величиной, определяемой отношением математического ожидания критерия прочности m_k к математическому ожиданию значения разрушающего фактора m_p .

$$\eta = \frac{m_k}{m_p}. \quad (3)$$

Оба показателя являются случайными факторами. Отказ может происходить при различных значениях критерия прочности. Его математическое ожидание m_k определяется в результате статистической обработки результатов разрушения конструкции при периодических испытаниях. С другой стороны, случайный характер имеет и значение разрушающего фактора, так как оно зависит не только от действующей случайной нагрузки (например, от давления, которое может иметь всплески при гидравлическом ударе), но и от упругих характеристик материала, которые тоже могут иметь разбросы.

Здесь надо иметь в виду, что понятия прочность и разрушающий фактор в рамках НИОКР трактуются расширительно, понимая при этом любую потерю необходимой функциональной способности трубопровода. Основными видами отказа для композитных труб являются потеря

герметичности (наиболее часто встречающийся вид отказа), потеря устойчивости и необратимое разрушение под воздействием статической нагрузки. Каждому из перечисленных видов отказа соответствует свой критерий прочности и свое значение разрушающего фактора.

Отказ композитных труб происходит обычно во временном процессе, когда критерий прочности, соответствующий определенному виду отказа, становится меньше количественного показателя разрушающего фактора. Все временные процессы, приводящие к отказу, будь то изменения прочностных показателей или накопления повреждений в полимерной матрице, носят вероятностный характер. Мерой функциональной надежности является вероятность безотказной работы трубы при нормированной долговечности. Для вычисления запаса прочности необходимо статистические параметры m_k и m_p . Достаточно оснований предполагать, что их распределения соответствует закону Гаусса.

Дальнейшие математические выкладки приводятся применительно к наиболее часто встречающемуся виду отказа композитных труб в виде потери герметичности при длительном нагружении в контакте с транспортируемой жидкостью. Этому виду отказа соответствуют величины расчетного значения относительного удлинения ε_p и относительного удлинения ε_k , соответствующего потере герметичности композитных труб (критерий прочности при потере герметичности).

Ниже приведены кривые нормального распределения показателей $\varphi(\varepsilon_k)$ и $\varphi(\varepsilon_p)$ (рис.6).

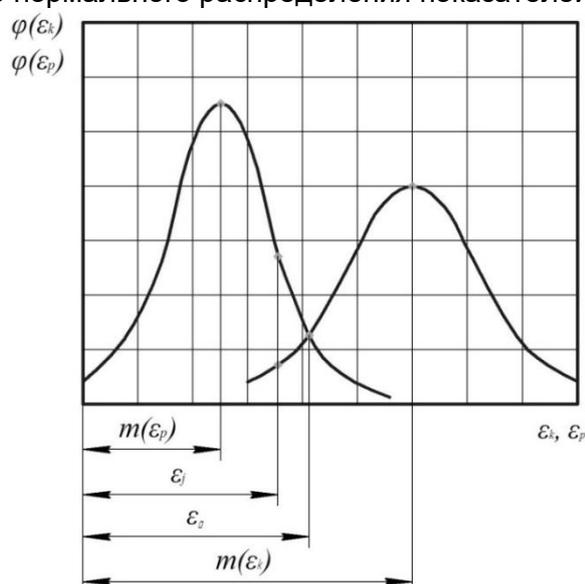


Рис. 6. Кривые распределения показателей разгерметизации композитных труб
Fig. 6 Curves of distribution of indicators of depressurization of composite pipes

Предполагается, что между обоими показателями не существует корреляционной связи. Тогда вероятность разгерметизации $P_{depress}$ равна

$$P_{depress} = P_1(\varepsilon_p > \varepsilon_j) \cdot P_2(\varepsilon_k < \varepsilon_j), \quad (4)$$

Каждая из вероятностей $P_1(\varepsilon_p > \varepsilon_j)$ и $P_2(\varepsilon_k < \varepsilon_j)$ определяются как функции нормального стандартного распределения, один из интервалов которых связан с фактически действующим значением относительного удлинения ε_j

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_p(\varepsilon_j)}^{\infty} \exp\left(-\frac{t_p^2}{2}\right) dt, \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_k(\varepsilon_j)}^{\infty} \exp\left(-\frac{t_k^2}{2}\right) dt. \quad (6)$$



Здесь (в общем виде, без нижних индексов p и k)

$$t = \frac{\varepsilon - m(\varepsilon)}{\sigma(\varepsilon)},$$

$$t(\varepsilon_j) = \frac{\varepsilon_j - m(\varepsilon)}{\sigma(\varepsilon)},$$
(7)

где $m(\varepsilon) = \frac{\sum \varepsilon_i}{n}$ это математическое ожидание,

$\sigma(\varepsilon) = \sqrt{\frac{(\varepsilon - m(\varepsilon))^2}{n}}$ это среднеквадратическое отклонение.

В реальном представлении необходимо учитывать вероятность разрушения, связанную с тем, что величина ε_j при которой может иметь место отказ, фактически должна находиться в интервале между двумя математическими ожиданиями m_p и m_k . За пределами этого интервала вероятность отказа, определяемая произведением двух вероятностей P_1 и P_2 , ничтожно мала (это следует из симметричного характера кривой распределения каждой из рассматриваемых величин и ниспадающей ветвью на данном интервале другого параметра). В тоже время, совершенно не обязательно, что величина ε_j будет равна ε_0 . Задача обоснования коэффициента запаса, таким образом, сводится к определению такого значения ε_j , при котором вероятность отказа $P_{depress}$ будет максимальной.

Расчеты по указанным зависимостям являются достаточно громоздкими и далеко не всегда оправданными. На практике статистическое обоснование коэффициента запаса прочности обычно производится только частично, в отношении критерия прочности при кратковременном нагружении. Статистические характеристики этого показателя получаются достаточно просто и убедительно, к тому же, его вклад применительно к коэффициенту запаса прочности является преобладающим. Что касается получения характеристик длительной прочности композитных труб, то в методике расчета трубопроводов из полимерных композитных материалов введено обоснование η по одному показателю, соответствующему кратковременной прочности, а факторы длительной прочности и отклонения фактической нагрузки от расчетного значения целесообразно учитывать введением дополнительных коэффициентов

$$\eta = \eta_k \cdot k_i \cdot k_p,$$
(8)

где η_k это коэффициент запаса, обусловленный случайным характером критерия прочности;

k_i это коэффициент, учитывающий снижение критерия прочности при длительном нагружении в контакте с жидкостью, имеющей заданную температуру (старение полимерных композитных материалов);

k_p это коэффициент, учитывающий случайные всплески нагрузки, разбросы упругих свойств материала и неточности выбранной методики расчета.

В настоящей работе приведены результаты исследования разбросов разрушающих нагрузок и испытаний с длительным воздействием температуры, что позволило оценить коэффициент k_i в зависимости от температуры жидкости.

Коэффициент k_p может находиться в пределах 1.2...1.4. Меньшие из рекомендуемых значений относятся к случаям более достоверных и точных расчетов и деталям невысокой



ответственности. Большие значения k_p соответствуют случаям более достоверных расчетов, а также к деталям высокой ответственности, выход которых из строя может привести к авариям или большим материальным потерям.

Коэффициент η_k , учитывающий статистическую природу критерия прочности, целесообразно выбирать равным

$$\eta_k = \frac{m_k + 3\sigma_k}{m_k}. \quad (9)$$

Здесь математическое ожидание m_k и среднеквадратическое отклонение σ_k критерия прочности определяются из статистически обработанных данных по разрушению конструкции на периодических испытаниях.

Известно, что при нормальном распределении 99.7% случайных величин находятся по обе стороны от математического ожидания параметра в интервале $\pm 3\sigma$. Таким образом, назначаемый, согласно этой рекомендации, коэффициент запаса η_k обеспечивает надежность конструкции на уровне $1 - 0.5 \cdot (1 - 0.997) = 0.9985$.

4 Conclusions

В соответствии с результатами исследования получены новые коэффициенты запаса прочности для различных видов композитных труб, работающих в конкретных условиях агрессивных сред:

1. Для труб систем холодного водоснабжения коэффициент вариации при определении относительного удлинения (критерия герметичности) не превышает 12%. В этом случае коэффициент η_k , зависящий от разбросов параметров полимерных композитных материалов, равен 1.36. Составляющие коэффициента запаса прочности $k_t = 1.3$ и $k_p = 1.35$. Таким образом, целесообразно установить величину $\eta = 2.4$.

2. Для труб систем горячего водоснабжения и отопления при температуре воды до 95°C вариация по относительному удлинению повышается до 16%, а составляющие запаса прочности, коэффициент запаса прочности $\eta = 2.9$. Для температуры воды до 135°C величина k_t увеличивается до 1.75, а коэффициент запаса прочности увеличивается до 3.6.

3. При периодических испытаниях композитных труб получены коэффициенты вариации давлений разгерметизации от 10.2% до 12.4%. Поскольку величина условного давления P_y уже учитывает коэффициент безопасности k_p , величина давления опрессовки труб во время приемосдаточных испытаний должна превышать P_y на 25...37%. Согласно нормативным документам, давление опрессовки труб назначается равным от 1.25 до 1.5 P_y . Для труб тепловых систем, работающих при очень высоких температурах, может потребоваться увеличить давление опрессовки до $2 P_y$.

References

1. Bakaiyan H., Hosseini H., Ameri E. Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations // *Composite Structures*. 2009. Vol. 88, № 4.
2. Sulu I.Y., Temiz S. Stress Analyses of Multi-Layered Composite Pipes // *Academic Journal of Science*. 2015. Vol. 04, № 03.
3. Sulu I.Y., Temiz S. Failure and stress analysis of internal pressurized composite pipes joined with sleeves // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2018. Vol. 32, № 8.
4. Sulu I.Y., Temiz S. Mechanical characterization of composite pipe systems joined using different radii pipes subject to internal pressure // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020.



5. Bobba S. et al. Effects of ageing on the mechanical and structural properties of glass/epoxy composite pipes in seawater // *JEC Composites Magazine*. 2019. Vol. 56, № 129.
6. Mishnev M. v. Estimation of sandwich cylindrical shells with the FRP skins and the core of the mineral wool plates // *Shell Structures: Theory and Applications Volume 4 - Proceedings of the 11th International Conference on Shell Structures: Theory and Applications, SSTA 2017*. 2018.
7. Korolev A. et al. Polymers under load and heating deformability: Modelling and predicting // *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 3.
8. Toh W. et al. Material characterization of filament-wound composite pipes // *Composite Structures*. 2018. Vol. 206.
9. Mezghani K. Long term environmental effects on physical properties of vinylester composite pipes // *Polymer Testing*. 2012. Vol. 31, № 1.
10. Azizian M. et al. A novel strategy for comparative numerical analysis of the response of buried composite and steel pipes subjected to realistic loading scenarios: FEA in cooperation with Taguchi approach // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122.
11. Majid M.S.A. et al. Stress-strain response modelling of glass fibre reinforced epoxy composite pipes under multiaxial loadings // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2014. Vol. 6.
12. Nazirah Z.S. et al. Modelling of glass fibre/epoxy composite pipes under multi-axial loadings using finite element analysis // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2016. Vol. 16, № 4.
13. Ang J.Y. et al. First-ply failure prediction of glass/epoxy composite pipes using an artificial neural network model // *Composite Structures*. 2018. Vol. 200.
14. Özbek Ö., Bozkurt Ö.Y., Erkliğ A. An experimental study on intraply fiber hybridization of filament wound composite pipes subjected to quasi-static compression loading // *Polymer Testing*. 2019. Vol. 79.
15. Metodieva P. et al. Design of Polymer Composite Pipes Produced By Filament Winding Technology // *Scientific Proceedings Xii International Congress "Machines, Technologies, Materials."* 2015. Vol. 1.
16. Üstün T. et al. Evaluating the effectiveness of nanofillers in filament wound carbon/epoxy multiscale composite pipes // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 96.
17. Prabhakar M.M. et al. An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability // *Composite Structures*. 2019. Vol. 230.
18. Maleki S. et al. Investigating the influence of delamination on the stiffness of composite pipes under compressive transverse loading using cohesive zone method // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2019. Vol. 13, № 6.
19. Gunoz A., Kepir Y., Kara M. Tensile Strength Alteration of GFRP Composite Pipes Under Seawater-Dominated Conditions // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020. Vol. 20, № 4.
20. Amid H. et al. Investigation of circular woven composite preforms for composite pipes // *Autex Research Journal*. 2016. Vol. 16, № 2.
21. Saghir F. et al. Mechanical characterization of particulated FRP composite pipes: A comprehensive experimental study // *Polymer Testing*. 2021. Vol. 93.
22. Gopi S. et al. Influence of water absorption on glass fibre reinforced IPN composite pipes // *Polimeros*. 2019. Vol. 29, № 3.
23. Rafiee R., Elasmı F. Theoretical modeling of fatigue phenomenon in composite pipes // *Composite Structures*. 2017. Vol. 161.
24. Benyahia H. et al. Mechanical properties of offshoring polymer composite pipes at various temperatures // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 152.
25. Oke W.A., Khulief Y.A. Dynamic Response Analysis of Composite Pipes Conveying Fluid in the Presence of Internal Wall Thinning // *Journal of Engineering Mechanics*. 2020. Vol. 146, № 10.
26. Bouhafs M., Sereir Z., Chateaneuf A. Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012. Vol. 95.