

УДК 658.562.012.7

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ. ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

© 2024 П.С. Щербань

АО ВНИИСТ, г. Москва, Россия

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Статья поступила в редакцию 12.02.2024

Управление качеством полимерных армированных труб разного типа, в особенности, на этапе эксплуатации остается слабоизученной областью, поскольку требует проведения комплексных исследований, сопряженных с использованием специального математического аппарата, физико-химических испытаний ряда материалов и разработки соответствующих методик и программного обеспечения. При этом базой для проводимых исследований должны стать системы показателей качества под каждый из типов армированных полимерных труб и их соединений. Критерии качества по существу являются нормами на показатели потребительских свойств структурных составляющих неделимых элементов технических систем (в данном случае армированных полимерных труб различных типов и их конструктивных элементов) в исходном состоянии и при внешних воздействиях на разных стадиях жизненного цикла. Ориентируясь на отклонения фактических показателей от изначально установленных и на степень их допустимости, можно оценить текущее состояние технической системы, следовательно, определить возможность ее дальнейшей эксплуатации, выявить связанные с этим риски и в целом разработать контур управления ее качеством путем дополнительного технического обслуживания, ремонта или принятия иных мер. Проклассифицируем имеющиеся на рынке типы полимерных армированных труб и сформируем системы показателей качества для каждого из типов труб. Это послужит необходимой базой для проведения последующих исследований и позволит разработать методики оценки технического состояния и управления качеством эксплуатируемых полимерных армированных труб.

Ключевые слова: полимерные армированные трубы, критерии качества, нормативная база, дефекты, управление качеством.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-80-95

EDN: IBRCNE

ВВЕДЕНИЕ

Согласно международному стандарту ISO 8402 качество продукции – это совокупность свойств и характеристик продукции, которые дают ей возможность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности. Исходя из данного определения, качеством полимерных армированных трубопроводов является возможность их безопасной эксплуатации с указанными в спецификации рабочими характеристиками. Качество трубопровода в данном случае напрямую характеризуется параметрами составляющих его частей: используемых труб, их соединений, арматуры и иных устройств, входящих в линейные сооружения.

Показатели параметров элементов системы (в частности, на такие ключевые как сами трубы и их соединения) должны быть измеряемыми и позволять оценивать величину их изменений во времени (в процессе эксплуатации). Это создает возможность для проведения диагностических

мероприятий, установления величины фактического отклонения показателей от проектных [1].

В результате динамика изменений показателей должна позволять рассчитывать и оценивать техническое состояние оборудования, моделировать процесс потери им потребительских свойств во времени (в целом прогнозировать сроки вывода его в ремонт либо замены). В настоящем исследовании рассмотрим непосредственно сами полимерные армированные трубы и установим систему показателей, по которым можно оценивать их качество.

1. ВИДЫ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ. ДЕЙСТВУЮЩАЯ НОРМАТИВНАЯ БАЗА

Существует большое количество различных полимерных армированных труб. Основное деление происходит по двум видам – это гибкий и жесткий типы полимерных армированных труб. Жесткие полимерные армированные трубы в свою очередь подразделяются на трубы, армированные лентой, армированные металлическим сетчатым каркасом либо армированные полимерным каркасом (Рисунок 1.). При этом,

Щербань Павел Сергеевич, кандидат технических наук, главный научный сотрудник АО ВНИИСТ, доцент ОНК «Института высоких технологий БФУ им. И. Канта». E-mail: ursa-maior@yandex.ru

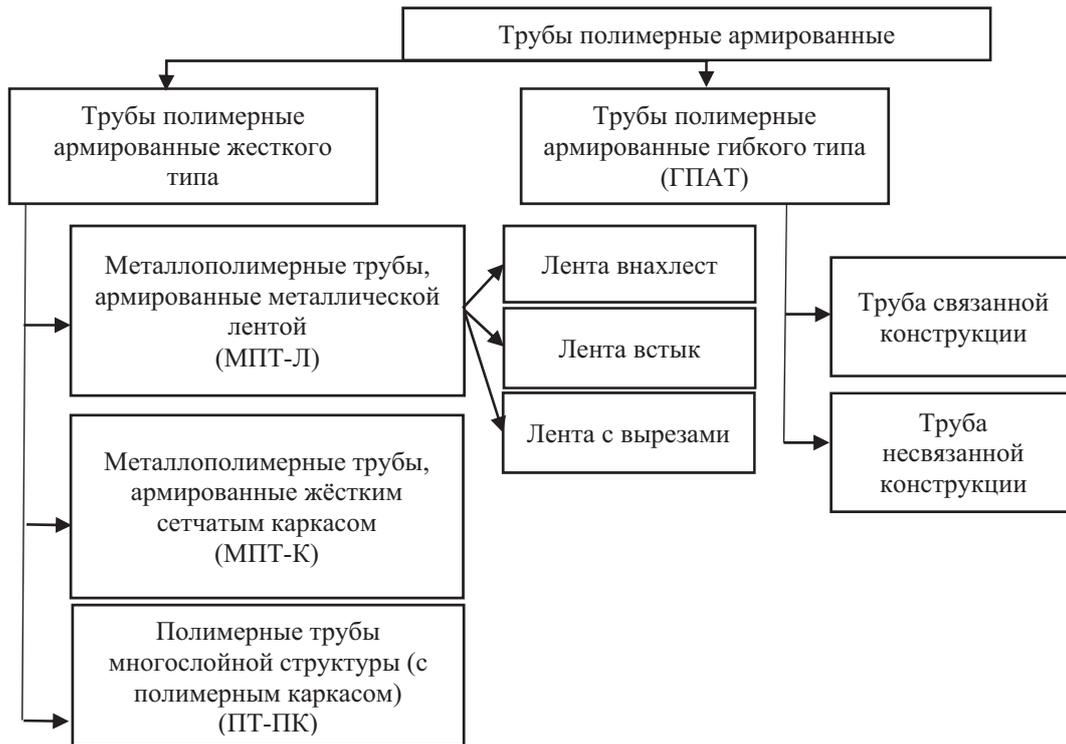


Рис. 1. Виды полимерных армированных труб

как правило, все эти типы труб многослойные и включают в себя как композитно-полимерные, так и металлические материалы [2].

В результате, когда речь идет о показателях качества сложносоставного оборудования необходимо детальнее рассмотреть его структурные элементы. В полимерных трубах, армированных металлическими лентами или сетчатым каркасом, ленты и каркас выполняют «несущую функцию», а полимерный материал внешней и внутренней оболочек совместно с возможными дополнительными защитными покрытиями – функции «защитающей матрицы» (Рисунок 2.). Таким образом, можно говорить о сумме качественных показателей, которые в целом определяют показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости несущего и матричного слоев трубы данного типа [3]. Используемые для ленточных и матричных

каркасов металлы, в основном, представлены нержавеющей стали марок AISI 304, 316 или A316L. Иногда, когда требуется высокая коррозионная стойкость, используется дуплексная сталь (UNS 31803). Структурообразующий слой может быть изготовлен из мартенситной стали (AISI 409, AISI 430), либо применяется углеродистая стали (например, NFA 36401) [4]. Материал футеровки (матрицы) зависит от условий проектирования. Используются следующие три общих класса: полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) и сшитый полиэтилен (ПЭ-С), полиамид (нейлон) (Rilsan PA11 или PA12), поливинилиденфторид (ПВДФ). Часто используются полиэтилен марок ПЭ-80, ПЭ-100, SPEX или полипропилен ПП-3 марки 23007-30Т. Защитные покрытия внутренней поверхности подобных труб могут быть представлены антифрикционными и антикоррозионными соединениями [5]. В качестве



Рис. 2. Металлополимерные трубы, армированные металлической лентой (МПТ-Л) и металлополимерные трубы, армированные жестким сетчатым каркасом (МПТ-К) [6,7]

внешних покрытий могут использоваться эпоксидно-полиуретановые гибридные соединения, а также могут привлекаться нанокompозитные составляющие. Важным фактором, помимо состава материалов, являются также и принципы устройства сложносоставной конструкции. Рядом исследований [6,7] указывается, что различные углы вязки каркаса или расположения металлических лент, по отношению к оси трубы, влияют на ее прочностные характеристики. Отдельно необходимо оговориться и о межслоевом взаимодействии. В трубах подобной конструкции важным критерием качества является показатель межслоевой адгезии.

Полимерные армированные трубы вместе с тем могут иметь неметаллический каркас либо быть произведены не в жестком, а в гибком исполнении (Рисунок 3.). Их армировка может производиться полимерным волокном, стекловолокном, полимерными нитями, кевларовыми нитями. В данном случае расположение нитей и ровингов относительно матрицы также оказывает существенное влияние на прочностные характеристики трубы. Гибкие полимерные армированные трубы имеют самую сложную компоновку, поскольку, как правило, состоят из нескольких чередующихся слоев [8]. При этом конструкция такой трубы одновременно должна обладать и прочностными характеристиками, и гибкостью, что может быть получено только с использованием специализированных структурирующих полимерных материалов, а также с применением ровингов, обеспечивающих прочность и имеющих разное направление навивки. Важным свойством подобных труб, во-первых, является наличие сетки нитей (либо хаотичное расположение волокон в трубах с несвязанными слоями), во-вторых, тип используемого материала. В случае использования нитей, созда-

ющих своего рода каркас, важным параметром (характеристикой) представляется величина угла перекрещивания между нитями, поскольку только определенные величины дают соответствующие несущие характеристики. Для стекловолокна либо обычного волокна значение имеет плотность слоя. В рассматриваемых композитах в качестве матрицы служат эпоксидные, эпоксифенолформальдегидные и другие смолы, а наполнителем - стеклоткань, волокна бора, углеродистые, органические и другие материалы. Наиболее распространенными высокопрочными полимерными композитами являются стеклопластики, органопластики, боропластики, карбопластики и др.

Широкое поле для работ в данном направлении продиктовано продолжающимся активным развитием трубопроводных систем полимерно-армированного типа, их апробацией для разных условий и транспортируемых жидкостей и газов. Работы должны быть связаны с проведением комплексных испытаний, накоплением статистических данных и установлением лучших практик [9]. Завершение этих процессов и обобщение полученных результатов позволит последовательно выработать недостающую нормативную базу. Вместе с тем уже на текущем этапе возможно сформировать общие требования к подобным трубам и их соединениям, получить критерии их качества. Это в свою очередь позволит прогностически моделировать процессы эксплуатации подобных труб, производить оценку рисков, выработать методики диагностики и оценки технического состояния, эффективность которых будет в последующем подтверждаться практикой применения [10]. Далее приведем систематику соединений неметаллических труб (в том числе, полимерных армированных трубопроводов) и систематику их

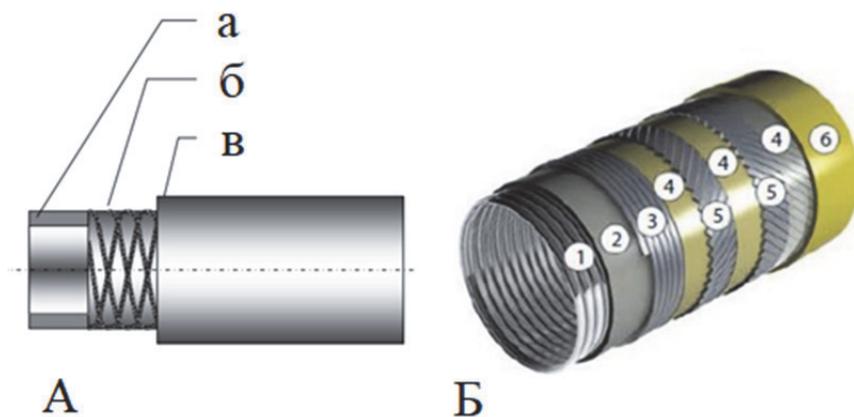


Рис. 3. Полимерные трубы многослойной структуры (с полимерным каркасом) (ПТ-ПК) – А: а- Внутренний полимерный слой; б- Армирующие нити; в- Наружный полимерный слой;

Трубы полимерные армированные гибкого типа (ГПАТ) – Б:

- 1- Каркас из нержавеющей стали; 2-Полимерный слой; 3-Структурообразующий слой на сжатие; 4-Полимерный слой; 5-Структурообразующий слой на растяжение; 6-Полимерная внешняя оболочка. [8]

отводов, поскольку фактически данные соединения, отводы и трубы и формируют линейные участки (Рисунок 4).

Из всех представленных типов соединений для полимерных армированных труб чаще всего встречается четыре типа: фланцевое, симметричный обжимной фитинг, фитинг под приварку, муфтовое для электрофузионной сварки (Рисунок 5.). Материал фитинга, обычно, выбирается на основе совместимости перекачиваемых жидкостей и антикоррозионных характеристик материала [11]. Углеродистая сталь обычно используется в тех случаях, когда коррозия не является основной проблемой,

например, для тестирования гибкой трубы, а также при транспортировке сухого газа. При транспортировке агрессивных жидкостей рекомендуется применять фитинги из нержавеющей стали.

В состав линейной части трубопроводов из полимерных армированных труб также помимо соединений входят и отводы различного типа (Рисунок 6.). Учитывая, что на отводы действуют несколько иные внешние и внутренние параметры и они имеют собственные специфические характеристики по сравнению с трубами или соединениями, рассмотрим также их на предмет показателей качества.

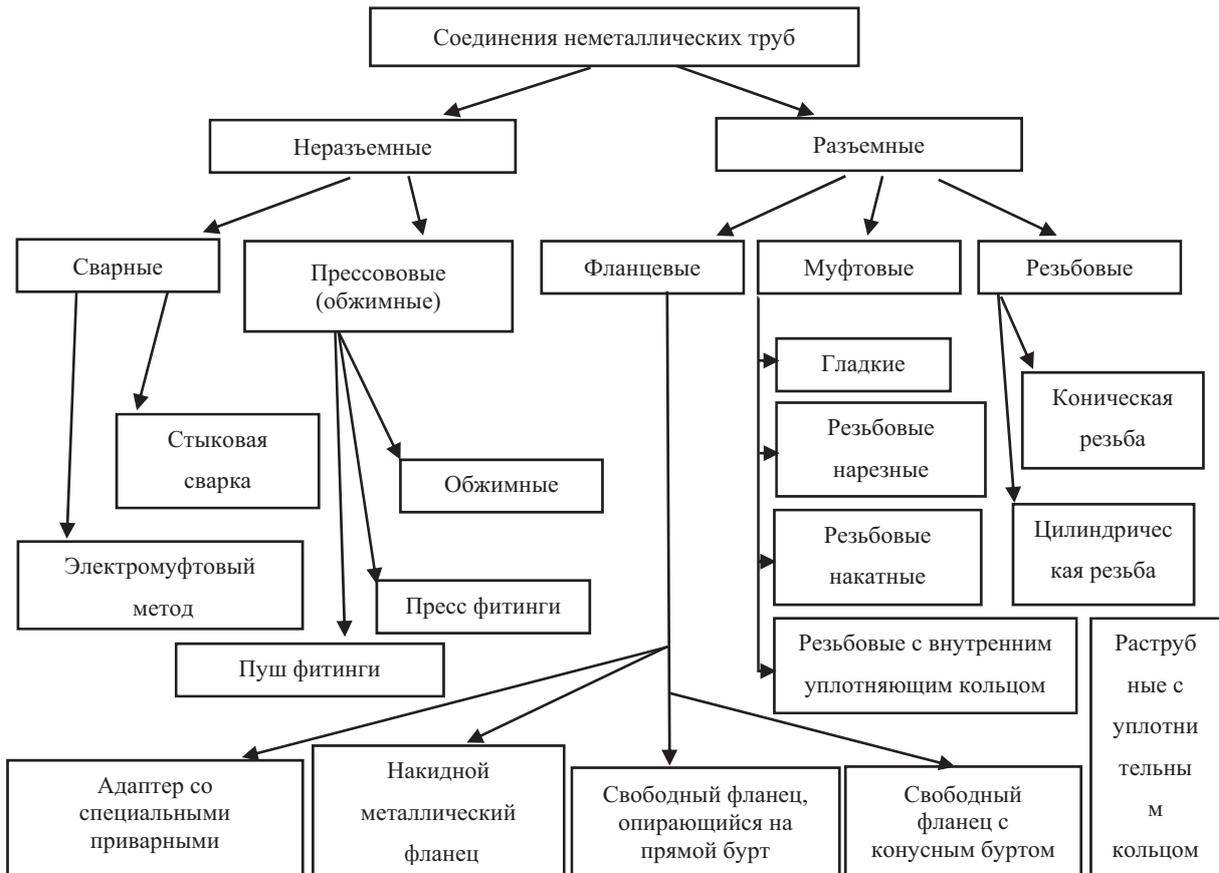


Рис. 4. Соединения неметаллических трубопроводов (включая соединения полимерных армированных труб)

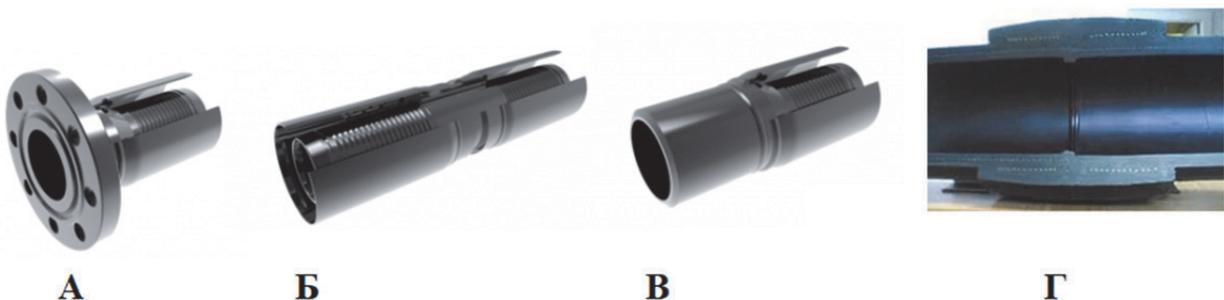


Рис. 5. Типы соединений полимерных армированных труб:

А- Фланцевый фитинг (болтовое соединение с уплотнительными элементами);
 Б- Симметричный фитинг; В- Фитинг под приварку; Г- Муфта электрофузионной сварки [11]

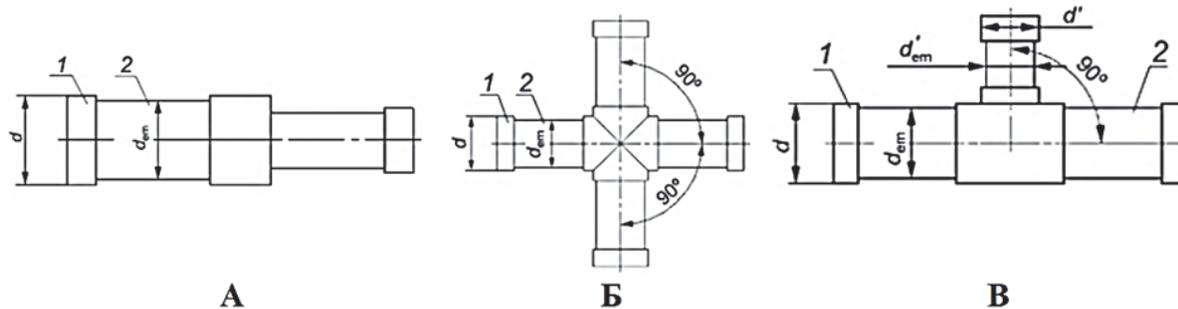


Рис. 6. Примеры отводов полимерных армированных труб:
 А - Сварной редуцирующий переход; Б - Равнопроходная тип; В - Неравнопроходной тип.
 1 – трубный конец; 2 – тело фитинга

В отношении стандартов для труб подобных типов разработан большой комплекс действующей нормативно технической документации. Среди международных документов, устанавливающих технические параметры на полимерные армированные трубы следует выделить группу стандартов ISO 13628, посвящённых различным системам подводной морской нефтедобычи, где в том числе отражаются требования к полимерным армированным трубам по типу райзера (ISO 13628-7) и использованную в качестве первоисточника американскую группу стандартов (API 17B – Рекомендуемое практическое руководство по гибким трубам; API 17J – по несвязанным гибким трубам, является эквивалентом; API 17K – по связанным гибким трубам) [8]. Кроме того, в настоящее время действуют ISO 8513:2023 «Системы пластмассовых трубопроводов. Трубы из термореактивного пластика, армированного стекловолокном» (GRP) и ISO 4427 «Стандартная труба из полиэтилена высокой плотности, армированная стальной сеткой SABS», а также ряд других локальных нормативных документов.

В Российской системе стандартизации в настоящее время действуют два основных нормативных документа: ГОСТ 32661 - 2014 «Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных волокном. Общие технические условия», ГОСТ Р 59910 – 2021 «Трубы полимерные, армированные металлическим каркасом, и соединительные детали к ним. Общие технические условия». При этом последний стандарт является крайне несовершенным в части его применимости реальными потребителями – эксплуатантами, и требует переработки, поскольку не содержит методических обоснований, в частности, по обеспечению прочностных и несущих характеристик.

При этом по целому ряду направлений либо осуществляется перевод и адаптация нормативных требований (как в случае с семейством стандартов ISO 13628), либо ведутся работы по созданию собственных нормативных документов, регламентирующих не только общетехнические требования, но и положения по диа-

гностике, безопасности и рискам применения полимерных армированных труб различного типа. Отметим также, что государственных нормативных документов по полимерным армированным стальной лентой либо неметаллическими соединениями трубам в настоящее не выработано.

2. СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ИХ СОЕДИНЕНИЙ И ОТВОДОВ

Разработаем систему показателей качества для полимерных армированных труб. Она будет основываться на трех блоках: во-первых, на блоке потребительских свойств, которые в свою очередь являются комплексными показателями качества продукции; во-вторых, на блоке условий применения продукции (видов воздействий); в-третьих, на блоке, определяющем фактический срок работы изделия (как результат взаимодействия условий применения и показателей качества объекта). При этом отметим, что создаваемая система будет соответствовать одному из важнейших требований квалиметрии – «измеримости» подлежащих контролю величин [11].

Описывая сформированную систему следует отметить, что каждый комплексный показатель качества в своей основе содержит ряд единичных показателей [12]. Если комплексный показатель качества, как правило, безразмерная величина, характеризующая для удобства сравнительного анализа в долях от единицы, то единичные показатели качества являются измеримыми величинами, что упрощает процедуру их контроля, позволяет применять весь комплекс методов математической статистики для обработки пакета получаемых данных. В ряде случаев, в приведенных системах, показатели, используемые в качестве «единичных», по существу, не являются таковыми и фактически представляют собой подсистемы, состоящие из единичных показателей (например, показатель S18 – Дефектность полимерной матрицы, либо S19 - Дефектность

несущего каркаса). Может возникнуть вопрос, почему в данном случае приведены не детализированные развертки показателей? Следует оговориться, что размер схем и рисунков в публикации не позволяют отображать единичные показатели качества детальнее [13]. Кроме того, в процессе дальнейшей исследовательской работы обозначенные подсистемы показателей будут

расширены и детализованы.

Представленный комплекс показателей теоретически достаточен для контроля и управления качеством полимерных армированных труб. При необходимости и в зависимости от специфических параметров труб или условий их использования он может быть дополнен (Рисунок 7). Вместе с тем, на пути его приме-

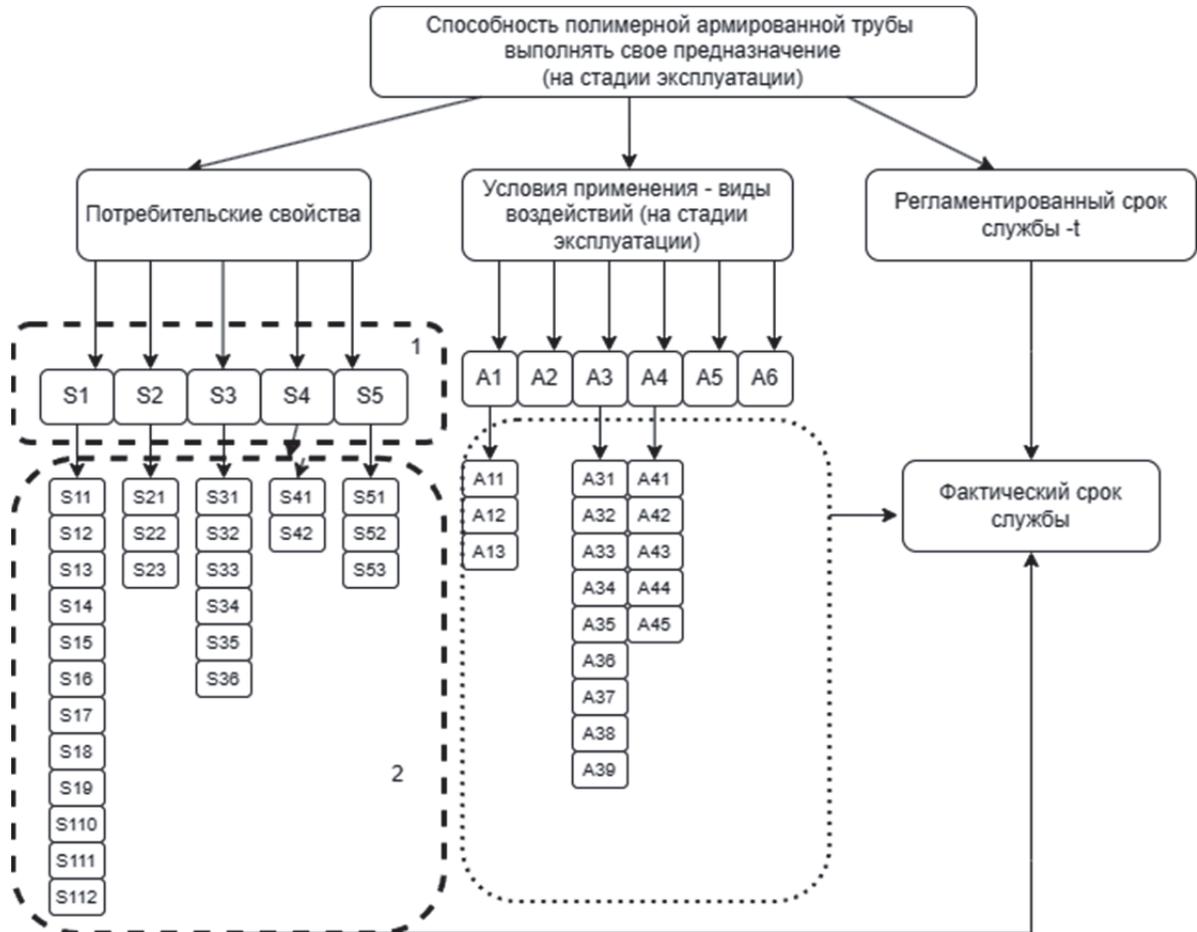


Рис. 7. Система показателей качества для полимерных армированных труб (на стадии эксплуатации): 1 – Критерии качества комплексные; 2-Критерии качества единичные. Критерии качества: S_1 – Способность выполнять свое назначение; S_{11} – Пропускная способность в заданном нормативном диапазоне (л/сек); S_{12} – Несущая способность в заданном диапазоне (МПа); S_{13} – Герметичность (МПа/сек); S_{14} – Дефектность внешней поверхности (мм.); S_{15} – Дефектность внутренней поверхности (мм.); S_{16} – Диэлектрическая сплошность (кВ); S_{17} – Адгезия полимерных слоев матрицы к несущему слою (МПа); S_{18} – Дефектность полимерной матрицы (мм); S_{19} – Дефектность несущего каркаса (мм); S_{110} – Кривизна (мм); S_{111} – Коэффициент линейного удлинения от внутреннего давления (мкм / МПа); S_{112} – Кольцевая жесткость(МПа); S_2 – Энергоэффективность (Гкал/м³); S_{21} – Удельные гидравлические потери (МПа/км); S_{22} – Тепловые потери (°С/км) (Мпа); S_{23} – Коэффициент линейного теплового расширения (мкм / м °С); S_3 - Надежность; S_{31} – Скорость уменьшения толщины стенки ($\Delta\delta/t$ – допустимое локальное уменьшение толщины стенки, мм., t – регламентированная наработка); S_{32} – Параметр потока отказов (км/год); S_{33} – Регламентированный срок службы (годы); S_{34} – Среднее время восстановления (сут.); S_{35} – Сохраняемость при консервации (годы); S_{36} – Вероятность безотказной работы; S_4 – Безопасность; S_{41} – Степень риска; S_{42} – Показатель ущерба от аварии (тыс. руб. / км в год); S_5 – Технологичность S_{51} – Трудоемкость монтажа (чел./час); S_{52} – Трудоемкость технического обслуживания (чел./час); S_{53} – Трудоемкость ремонта (чел./час); Виды воздействий: A_1 – Статическая нагрузка (кгс); A_{11} – Нагрузка под собственным весом (Н/м); A_{12} – Нагрузка под весом продукта (Н/м); A_{13} – Контактная нагрузка (посторонние предметы) (Н/м); A_2 – Катодная поляризация (В); A_3 – Внутренняя среда; A_{31} – Минерализованная вода (моль/м³); A_{32} – Нефть (рН); A_{33} – Сероводород (%); A_{34} – Углеродородный газ (%); A_{35} – Абразивные частицы (мкм); A_{36} – Кислоты (%); A_{37} – Парафины (%); A_{38} – Температура внутренней среды (°С); A_{39} – Постоянное давление (МПа); A_4 – Внешняя среда; A_{41} – Температура внешней среды (°С); A_{42} – Солнечная радиация (Вт / м²); A_{43} – Ветровые нагрузки (кгс/м²); A_{44} – Нагрузки морскими течениями (кгс/м²); A_{45} – Водопоглощение внешнего слоя (%); A_5 – Поперечный изгиб (Н/м); A_6 – Циклическая внутренняя нагрузка (кгс/м²/час).

нения возникает несколько существенных техниче- ских, методических, нормативных и орга- низационно-управленческих проблем, которые требуют рассмотрения и решения. Система по-

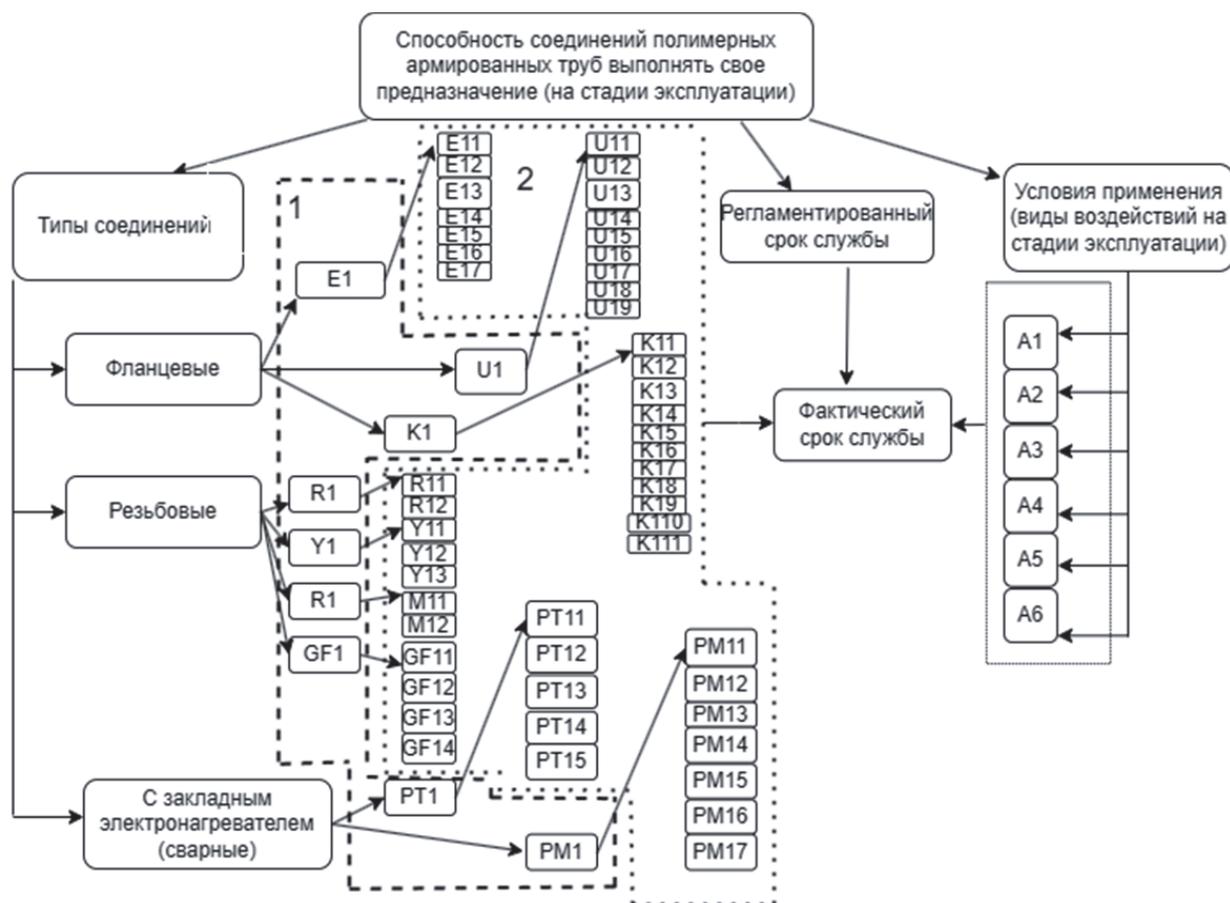


Рис. 8. Система показателей качества для соединений полимерных армированных труб (на стадии эксплуатации):

E_1 – Физико-химическая целостность фланцевого соединения; E_{11} – Диаметр фланца (мм); E_{12} – Диаметр основного отверстия (мм); E_{13} – Диаметр отверстия болтов (мм); E_{14} – Равномерность затяжки болтов (кгс·м); E_{15} – Прочность отверстия фланца (Кгс/см²); E_{16} – Коррозионная стойкость отверстия (мм/год); E_{17} – Нарушение геометрии фитинга; U_1 – Физико-химическая целостность уплотнительных поверхностей; U_{11} – диаметр (мм); U_{12} – отклонения формы от круглости (овальность, огранка и местная выработка) для фланца, резьбового соединения конца трубы (мм); U_{13} – отклонения формы от круглости для уплотнительных колец (мм); U_{14} – шероховатость (мкм); U_{15} – углы наклона уплотнительных поверхностей (град.); U_{16} – прямолинейность образующей уплотнительной поверхности (град.); U_{17} – перпендикулярность уплотнительной поверхности к оси фланца или резьбового конца трубы (град.); U_{18} – размеры дефектов (рисок, раковин, трещин, вмятин, следов коррозии) механического и коррозионного происхождения (мм). U_{19} – Нарушение геометрии уплотнительных колец (мм); K_1 – Физико-химическая целостность резьб крепежных деталей; K_{11} – параметр среднего диаметра резьбы (мм); K_{12} – шаг резьбы (мм); K_{13} – шероховатость поверхности ниток резьбы (мкм); K_{14} – прямолинейность стержня шпильки или болта (град.); K_{15} – дефекты резьбы и стержня крепежных деталей (забоины, задиры, вырывы, заусенцы, коррозия) (мм); K_{16} – дефекты резьбы фланца резьбового и резьбового конца трубы (мм); K_{17} – Сила затяжки болтов (кгс·м); K_{18} – Прочность болтов на скручивание(кгс/см²); K_{19} – Коррозионная стойкость болтов и внешних покрытий (мм/год); K_{110} – Стойкость к внутреннему давлению (Н/м²); K_{111} – Стойкость к растягивающей нагрузке (мкм / Н); R_1 – Качество резьбы; R_{11} – Геометрические параметры резьб (мм); R_{12} – Прочность резьбы (кгс/см²); Y_1 – Качество уплотнительного элемента; Y_{11} – Минимальная прочность на разрыв уплотнительных элементов для концов фитингов (МПа); Y_{12} – Номинальное давление (МПа); Y_{13} – Геометрические параметры отверстий (мм); M_1 – Качество муфты; M_{11} – Прочность муфты (кгс/см²); M_{12} – Геометрические параметры соединительной муфты (мм); GF_1 – Гильза и втулка; GF_{11} – Геометрические параметры гильзы (мм); GF_{12} – Толщина противокоррозионного покрытия (мм); GF_{13} – Прочность гильзы (кгс/см²); GF_{14} – Прочность полимерной втулки (кгс/см²); PT_1 – Параметры сварочного процесса; PT_{11} – Время сварки (сек.); PT_{12} – Время остывания (сек.); PT_{13} – Напряжение и сила тока в процессе монтажа (вольт); PT_{14} – Дефект нагревательного элемента (мм); PT_{15} – Расстояние между электросвариваемыми трубами (мм); PM_1 – Параметры материала; PM_{11} – Наружный и внутренний диаметры (мм); PM_{12} – Плотность облегаания муфтой соединяемых труб (г/см³); PM_{13} – Давление рабочее и максимальное (МПа); PM_{14} – Толщина стенки муфты (мм); PM_{15} – Физико-химические свойства материала муфты; PM_{16} – Нарушение геометрии муфты (мм); PM_{17} – Наличие включений в теле муфты (%).

казателей ориентирована только на параметры полимерных армированных труб и не учитывает показатели соединений таких труб [14]. Представим также и систему показателей качества на соединения полимерных армированных труб (Рисунок 8).

Соединения при этом могут быть различного вида: резьбового, фланцевого, с использованием электромуфты. При этом блок условий применения (виды внешних воздействий) фактически не претерпит изменений, поскольку соединения труб находятся в той же среде, что и сами трубы. В тоже время, значительные изменения возникнут в блоке потребительских свойств, во-первых, из-за рассмотрения различного типа соединений, во-вторых, из-за существенного изменения базовых показателей качества в сравнении с трубными [15].

Так первой группой соединений являются классические фланцевые болтовые соединения, в которых основным методом фиксации является стягивание концов трубы посредством болтов, стержней и использования прокладок. В данном случае основную роль играет ряд механических параметров создаваемой соединительной системы. Вторым способом является резьбовой фитинг с обжимом. Он также характеризуется в основном геометрическими параметрами и механикой сборки [16]. Принципиальным отличием третьего типа - электросварных фитингов, является возможность применения электросварки с контролируемыми параметрами деформации. Это основная технология соединения электросварных фитингов. Но также не исключается и традиционный механический крепеж. Для этого применяют интегрированные зажимы в конструкции муфты. Стык формируется держателями, физически не позволяющими двум окончаниям труб разойтись. Но и в этом случае для обеспечения герметизации может подключаться техника электросварного припоя пластика. Кроме того, может применяться и сварка встык. Она представляет собой простой нагрев торцов трубопровода из пластика, при котором все свариваемые элементы нагреваются до вязко-текучего состояния, после чего концы полиэтиленовых труб под давлением соединяются. При выполнении подобной работы изделие должно быть жестко зафиксировано, не допускаются сдвиги и другие движения во время самой сварки и остывания.

Отдельно рассмотрим и показатели качества отводов, поскольку они играют важную роль в работе линейной части трубопроводов из полимерных армированных труб (Рисунок 9). Среди критически важных параметров здесь следует выделить ряд геометрических (углы загиба, виды соединений и его геометрия, шероховатость), ряд прочностных (прочностные характе-

ристики материала внутреннего полимерного слоя, прочностные характеристики материала наружного полимерного слоя) и ряд физических (температура, номинальное давление). Детально требования на соединения и отводы полимерных армированных труб указываются в ГОСТ Р 59910-2021 и ISO/TR 10358.

Естественным вопросом, следующим за представленным перечнем величин, является их получение. Это требует подбора соответствующих диагностических инструментов, разработки надлежащих методик и формирование соответствующих положений в нормативных требованиях [17]. Данная проблематика находится в активном изучении и широко представлена в ряде работ [18,19]. В настоящей работе не будем затрагивать, собственно, диагностические методы, поскольку это требует отдельного цикла публикаций. Оговорим лишь только, что в полимерных армированных трубах применение диагностического оборудования осложняется многокомпонентным составом. Так в случае морских райзеров либо труб, расположенных по поверхности земли, возможно использовать радиографический контроль. Принцип его действия, основанный на прохождении излучением объекта контроля, позволяет определить внутренние дефекты как в металлическом, так и в неметаллическом слое, и на границе сред и установить большинство из необходимых диагностических параметров [20]. Однако в значительном числе случаев, например, при заглублении трубопровода в грунт, прокладке его в бетонном коробе, либо при параллельной прокладке нескольких трубопроводов использование радиографического контроля невозможно в виду ограничения на размещение приемника радиационных волн (который в данном методе располагается на противоположной стороне трубы по отношению к излучателю). В результате для определения различных параметров эксплуатируемой трубы, а также для выявления дефектов необходимо использовать группу методов [21]. Наиболее эффективными показали себя опыты сочетанного использования ультразвукового, магнитометрического, вихретокового и оптического методов. Так ультразвуковой и оптический методы позволяют выявлять изменения в структуре полимерной матрицы, внешнего и внутреннего защитного покрытия, определять размеры дефектов, характер расположения и распространения, как в трубе, так и в соединениях либо отводах.

При этом возникает ряд методологических вопросов: как нормализовать получаемые данные; как осуществить их сверку; как сформировать на их основе полноценную модель; как проводить сравнение фактических данных получаемых по результатам неразрушающего

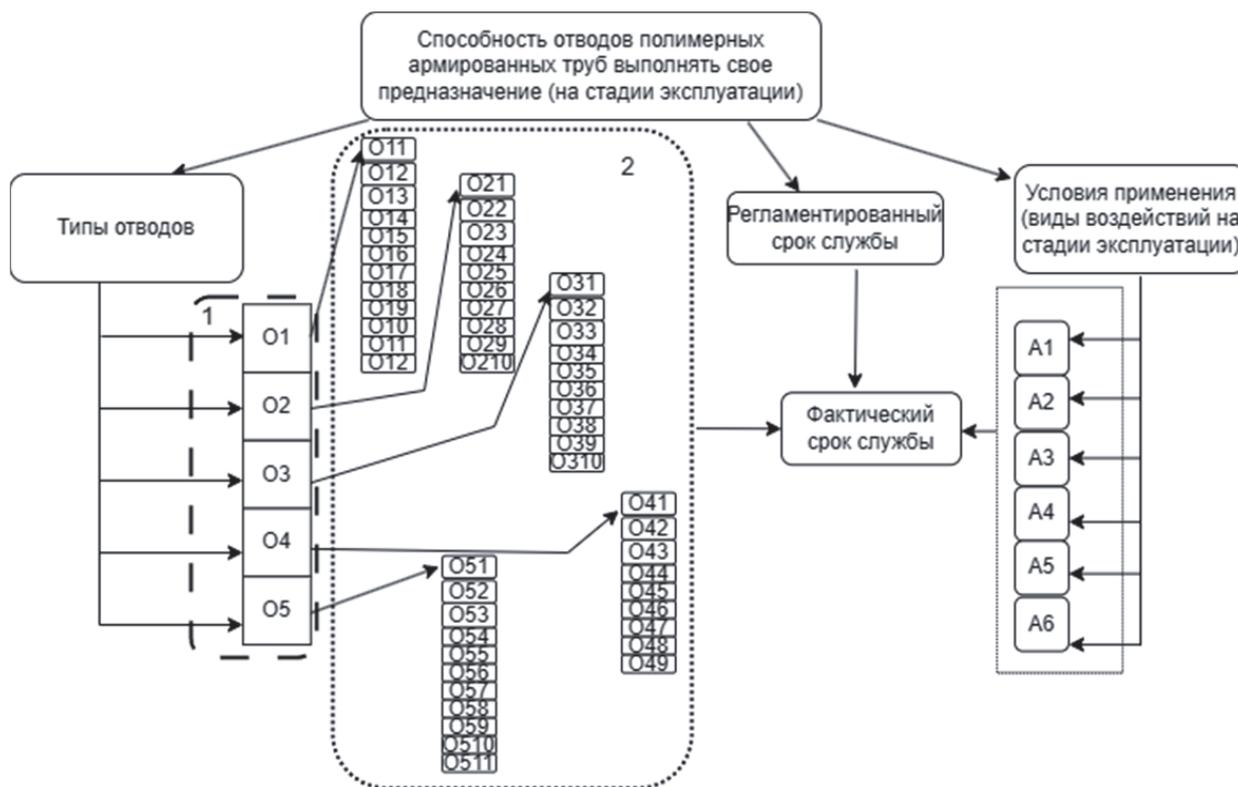


Рис. 9. Система показателей качества для отводов

полимерных армированных труб (на стадии эксплуатации):

O_1 – Качество сварных сегментных отводов; O_{11} – Номинальный размер отверстия, (мм). O_{12} – Номинальный внутренний диаметр, (мм); O_{13} – Угол загиба, (град.); O_{14} – Угол в стыке, (град.); O_{15} – Тип отвода и его геометрические параметры, (мм); O_{16} – Прочностные характеристики материала внутреннего полимерного слоя (кгс/см²); O_{17} – Прочностные характеристики материала наружного полимерного слоя (кгс/см²); O_{18} – Номинальное давление PN, (МПа); O_{19} – Рабочая температура, (°C); O_{110} – Вид соединения и его геометрия (мм); O_{111} – Параметры транспортируемого продукта, назначение (нефть, газ, вода); O_{112} – Шероховатость внутренней поверхности (мкм); O_2 – Качество сварного тройника; O_{21} – Номинальный размер (мм); O_{22} – Номинальный внутренний диаметр через, (мм); O_{23} – Тип тройника и его геометрические параметры (мм); O_{24} – Прочностные характеристики материала внутреннего полимерного слоя (кгс/см²); O_{25} – Прочностные характеристики материала наружного полимерного слоя (кгс/см²); O_{26} – Номинальное давление PN, (МПа); O_{27} – Рабочая температура, (°C); O_{28} – Вид соединения и его геометрия; O_{29} – Параметры транспортируемого продукта, назначение (нефть, газ, вода); O_{210} – Шероховатость внутренней поверхности (мкм); O_3 – Качество сварной крестовины; O_{31} – Номинальный размер, (мм); O_{32} – Номинальный внутренний диаметр, (мм); O_{33} – тип и геометрические параметры крестовины; O_{34} – Прочностные характеристики материала внутреннего полимерного слоя (кгс/см²); O_{35} – Прочностные характеристики материала наружного полимерного слоя (кгс/см²); O_{36} – Номинальное давление PN, (МПа); O_{37} – Рабочая температура, (°C); O_{38} – Вид соединения и его геометрия; O_{39} – Параметры транспортируемого продукта, назначение (нефть, газ, вода); O_{310} – Шероховатость внутренней поверхности (мкм); O_4 – Качество неравнопроходного перехода; O_{41} – Номинальный размер, (мм); O_{42} – Номинальный внутренний диаметр, (мм); O_{43} – Прочностные характеристики материала внутреннего полимерного слоя (кгс/см²); O_{44} – Прочностные характеристики материала наружного полимерного слоя (кгс/см²); O_{45} – Номинальное давление PN, (МПа); O_{46} – Рабочая температура, (°C); O_{47} – Вид и геометрические параметры соединения; O_{48} – Параметры транспортируемого продукта, назначение (нефть, газ, вода); O_{49} – Шероховатость внутренней поверхности (мкм); O_5 – Качество перехода для присоединения к металлическим трубопроводам; O_{51} – Тип перехода и соответствие его геометрических параметров нормам: P – разборный, Н – неразборный; O_{52} – Типоразмер металлической трубы, (мм); O_{53} – Толщина стенки металлической трубы, (мм); O_{54} – Материал металлической трубы; O_{55} – Номинальные размеры DN/OD и номинальный внутренний диаметр через «/», (мм); O_{56} – Прочностные характеристики материала внутреннего полимерного слоя (кгс/см²); O_{57} – Прочностные характеристики материала наружного полимерного слоя (кгс/см²); O_{58} – Номинальное давление PN, (МПа); O_{59} – Рабочая температура, (°C); O_{510} – Параметры транспортируемого продукта, назначение (нефть, газ, вода); O_{511} – Шероховатость внутренней поверхности (мкм).

контроля в процессе эксплуатации с данными полученными при приемке оборудования после строительства линейного участка, либо сравнивать их с требованиями проектной документа-

ции [22]? Отметим также, что ряд параметров (показателей качества) фиксируется не только за счет неразрушающего контроля полимерных армированных труб и их соединений [23].

Например, они фиксируются в ходе эксплуатации (температура и давление жидкости и газов) или только при непосредственном вскрытии и разрушающем контроле (например, шероховатость), либо они же могут быть установлены в случае, если параллельно с действующей трубопроводной системой из полимерных армированных труб, проложен специальный участок для контроля состояния (параллельный короткий лупинг для снятия данных о техническом состоянии). Так происходит сбор данных о фактическом состоянии объекта контроля [24]. Далее оценивается изменение величины каждого из параметров элементов системы относительно базовых значений, указанных в спецификации на оборудование (либо в нормативной документации) [25]. После чего осуществляется расчет единичных и комплексных показателей качества, и определяется, на сколько изменилось качество системы за период эксплуатации.

Здесь следует отметить, что «идеального качества» в целом не бывает. Бывает большее или меньшее соответствие требованиям потребителя, а также соответствие или несоответствие показателей заявляемым производителем нормативным документам (в контексте обеспечения надежности и безопасности). В результате можно утверждать, что уже на этапе ввода в эксплуатацию отдельно взятые элементы трубопроводной системы (сами полимерные армированные трубы, соединения, отводы) имеют интегрированный показатель качества менее 1,0. Учитывая построенную иерархическую систему (Рисунки 7-9), разработаем математический аппарат, позволяющий сравнивать базовые величины показателей качества их изменения, фиксировать изменения комплексных показателей качества и интегрированного показателя. При этом отметим, что использование для подобных сложных систем классических квалиметрических подходов требует очень глубокого переосмысления, а фактически - использования более сложного механизма. Данные вопросы, а также предложения по математическому аппарату, необходимому для обработки результатов контроля показателей качества полимерных армированных труб, рассмотрим в следующем разделе.

3. АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ К ПОЛИМЕРНЫМ АРМИРОВАННЫМ ТРУБАМ. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРНОГО ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ

В соответствии с «Методическими указаниями по оценке технического уровня и качества промышленной продукции. РД 50-149-79» при оценке уровня качества, т.е. технического уровня однородных изделий, рекомендовано ис-

пользовать дифференциальный, комплексный и смешанный методы. Последовательно рассмотрим каждый из них и установим возможность и невозможность их эффективного применения к полимерным армированным трубам на стадии эксплуатации.

Так, например, дифференциальный метод оценки качества оборудования заключается в сопоставлении показателей отдельных свойств оцениваемого образца с соответствующими показателями базового образца. При этом в дифференциальном методе оценка качества продукции происходит через единичные или обобщенные показатели свойств:

$$Q_i = \frac{x_{ai} - x_{nai}}{x_{i6аз} - x_{nai}}; \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{x_{i6аз}}{x_{ai}}; \quad Q_i = \frac{y_{i6аз}}{y_{ai}}, \quad \text{при } i=1,2,\dots,n, \quad (2)$$

где: Q_i – показатель качества; $x_{i6аз}$ и $y_{i6аз}$ – значения i -го единичного и обобщенного показателя свойств оцениваемого оборудования; x_{ai} и y_{ai} – значения i -го показателя базового образца; x_{nai} – предельное значение i -го параметра

Данный метод позволяет довольно эффективно проводить оценку отдельно взятых показателей в количественном отношении (динамику их изменения относительно базовых образцов) и он же может являться неплохим квалификационным аналитическим аппаратом, который позволяет оценивать полимерные армированные трубы по таким категориям качества, как «превосходит», «соответствует» или «не соответствует» определенному уровню качества аналогичных изделий [26].

Описанные свойства данного метода удобны как инструмент контроля при производстве полимерных армированных труб, но они мало пригодны в качестве инструмента оценки качества на стадии эксплуатации труб ввиду слишком большого количества факторов, требующих учета.

Комплексный метод предусматривает использование ряда показателей совокупностей свойств. Его применяют при оценке качества сложных изделий [27]. Подобный комплексный показатель качества зависит от «взвешенных» параметров учитываемых свойств, т.е. от показателей отдельных свойств с учетом их весомости для объекта в целом. К подобному комплексному показателю применяют ряд требований: репрезентативность, монотонность, чувствительность, нормированность и сравниваемость. Показатель обычно определяется как средневзвешенный арифметический, либо средневзвешенный геометрический в зависимости от того, влияние свойств на величину показателя Q_i подчиняется линейной или нелинейной степенной зависимостям [24]. Показатель совокупности свойств зависит от «взвешенности» параметров учитываемых показателей. В результате на

первом этапе находят средневзвешенные арифметические значения совокупных показателей свойств одного из показателей:

$$C_{ia} = \sum_{i=1}^n c_i = \sum_{i=1}^n a_i q_i = a_1 q_1 + a_2 q_2 + \dots + a_n q_n; \quad (3)$$

где a_i – коэффициент весомости; q_i – нормализованная, безразмерная величина i -го параметра; n – число параметров.

Либо средневзвешенные геометрические значения совокупных показателей свойств одного из показателей:

$$C_{ig} = \prod_{i=1}^n (q_i)^{m_i} = b_1 \sqrt{q_1} b_2 \sqrt{q_2} \dots b_n \sqrt{q_n}; \quad (4)$$

где $m_i = \frac{1}{b_i}$ – коэффициент весомости; b_i – знаменатель числа i -го показателя весомости (степени, корня); q_i – безразмерное (приведенное коэффициентом преобразования w) значение параметра i -го свойства; n – число параметров

Далее используются формулы по определению комплексного показателя уровня качества, определяемого по средневзвешенным арифметическим (5) либо геометрическим (6) значениям отдельных уровней свойств:

$$Q_a = \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{\Delta x_i}{x_{i6as}} \right); \quad (5)$$

$$Q_g = \prod_{i=1}^n (q_i)^{m_i} \left(\frac{\Delta x_i}{x_{i6as}} \right). \quad (6)$$

Однако, применение такого подхода для рассматриваемого случая тоже не является оптимальным, поскольку использование как средневзвешенного арифметического, так и средневзвешенного геометрического при определении комплексного показателя ведет к размыванию картины и, при большой выборке, к невозможности идентификации выбросов по отдельным, в том числе, критичным параметрам, а кроме того может слабо сказываться на самом показателе качества в виду неверной оценки коэффициентов весомости.

Смешанный метод, представляющий собой комбинацию комплексного и дифференциального в своей основе содержит те же отрицательные стороны и не позволяет осуществлять изменение числа исходно рассматриваемых параметров – это делает систему показателей качества жесткой. В результате представленные на рисунках 7-9 системы показателей требуют обработки данных и выдачи результатов по комплексному критерию качества эксплуатируемой полимерной армированной трубы, на основе иных методов.

Разработаем метод оценки качества эксплуатируемых полимерных армированных труб, позволяющий учитывать все многообразие параметров и при этом не завесить от проблемы случайных выбросов и определения усреднен-

ных значений по оцениваемой выборке. Для этого применим настраиваемые под конкретные показатели вектор индекса качества (ВИК).

Пусть дан набор данных, полученных измерением n показателей m полимерных армированных труб/отводов/соединений. Такой набор данных формирует матрицу размера $n * m$, каждая строка которой описывает значения показателя, а каждый столбец – трубу/отвод/соединение.

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Соответственно, элемент p_{ij} является значением показателя i у j трубы/отвода/соединения.

Запишем эту матрицу следующим образом:

$$Q = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В данной записи, $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})$ является вектор-строкой измерений показателя i каждого из m труб/отводов/соединений.

Первым шагом метода ВИК является агрегация данных в один вектор признаков, при этом не теряя важной информации. Стандартный метод получения значения, характеризующего ряд измерений – это расчёт среднего значения этого ряда. Такой подход является проблематичным в случаях, когда в ряде имеется большой разброс значений. Если количество крайних значений в ряде достаточно мало, то их влияние может не отразиться в среднем значении ряда измерений (выбросы останутся незамеченными). Решение этой проблемы требует формального рассмотрения видов ограничений показателей. При этом требования любого нормативного документа будут, как правило, отражать всего лишь четыре вида зон допусков: параметр является допустимым в каких-то пределах (например, величина отклонения от оси, либо толщины стенки); параметр может быть только больше или равен какому-то значению (например, толщина защитного покрытия равна или не менее n мм.); параметр может быть только меньше или равен какому-то значению (например, рабочее давление не более n МПа); параметра может быть жестко зафиксированное значение (например, трещины не допускаются). Математически все эти параметрические характеристики, налагаемые нормативной документацией, можно выразить как:

1) Интервал допустимых значений показателя: $a < p < b$;

2) Луч допустимых значений показателя: $a \leq p$ или $p \leq b$;

3) Булевый показатель: $p = \{0, 1\}$.

Так как итоговый показатель качества должен быть чувствительным к ненормативным

значениям, то в качестве агрегированного значения ряда измерений можно взять наихудшее, с точки зрения ограничений, значение. Каждый вид ограничений имеет разное определение наихудшего значения. Построим функции $\rho: R^m \rightarrow R$ для каждого вида ограничений, которые ставят в соответствие вектору $P \in R^m$ из m значений показателя одно значение из множества действительных чисел – наихудшее значение показателя для данного ограничения.

В случае интервала определим ρ , как наиболее удаленную от середины интервала точку: $\rho(P) = \operatorname{argmax}_{p \in P} \left(\left| p - \frac{a+b}{2} \right| \right)$.

При ограничении с одной из сторон, в обоих вариантах, функцию ρ можно определить как точку, наиболее близкую к граничному значению или точку, которая наиболее удалена от луча: $\rho(P) = \operatorname{argmin}_{p \in P} (p - a)$ когда ограничение вида $a \leq p$ и $\rho(P) = \operatorname{argmin}_{p \in P} (b - p)$ в случае ограничения вида $p \leq b$.

Последний вид ограничений – булевый, является наиболее тривиальным случаем. Функция ρ для такого вида ограничений является конъюнкцией всех компонент вектора: $\rho(P) = \bigwedge_{p \in P} p$.

Результатом первого шага метода ВИК будет вектор \hat{Q} , полученный из матрицы Q применением функции ρ к каждой строке:

$$\hat{Q} = \begin{pmatrix} \rho(P_1) \\ \rho(P_2) \\ \dots \\ \rho(P_n) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Следующим шагом метода ВИК является нормализация компонент вектора \hat{Q} . Так как ВИК является индексом качества, то каждая компонента вектора, полученного в результате расчетов, должна находиться в отрезке $[0, 1]$, где 0 означает полную непригодность объекта по данному показателю, а 1 указывает на идеальное состояние объекта по рассматриваемому показателю.

Функция нормализации $N: R \rightarrow [0, 1]$ должна ставить в соответствие значению показателя значение из отрезка $[0, 1]$ на основе ограничений показателя. При этом каждый показатель может иметь свою скорость убывания качества

по мере приближения к граничным значениям. Также для сохранения информативности индекса, он должен быть непрерывным и кусочно-гладким.

Обеспечить такую настраиваемость и непрерывность можно с помощью свертки функции $f(p) = 1$ максимального значения индекса и некой кусочно-гладкой функции $g(p)$, которая определяет скорость падения индекса качества. Рассмотрим такие функции для каждого из видов ограничения.

Индекс качества для интервальных ограничений убывает по мере приближения к границам интервала, соответственно в качестве функции $N(p)$ должна быть функция, достигающего максимума в середине интервала и монотонно убывающая по мере отдаления от него. Такой функцией является, например, следующая функция:

$$N(p) = \begin{cases} \frac{(c - |p - c|)^\gamma}{c}, & a < p < b \\ 0, & p \notin (a, b) \end{cases}, \quad (10)$$

где $c = \frac{a+b}{2}$ – середина интервала (a, b) .

Эта функция достигает максимума при $p = c$. При этом максимум функции равен 1. Скорость убывания индекса в пределах поля допуска задается параметром γ (Рисунок 10).

Параметр γ устанавливается исследователем либо опытным путем, либо на основе мнения экспертов.

В случае ограничения вида луч индекс качества должен убывать только достаточно близко к граничному значению. В качестве такой функции можно взять:

$$N(p) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{p-a+1}^\gamma, & p \geq a \\ 0, & p < a \end{cases} \text{ для } a \leq p \text{ и}$$

$$N(p) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1+b-p}^\gamma, & p \leq b \\ 0, & p > b \end{cases} \text{ при } p \leq b. \quad (11)$$

Скорость убывания индекса регулируется также параметром γ (Рисунок 11).

Булевы ограничения уже находятся в интервале $[0, 1]$ и не требуют дополнительной обработки.

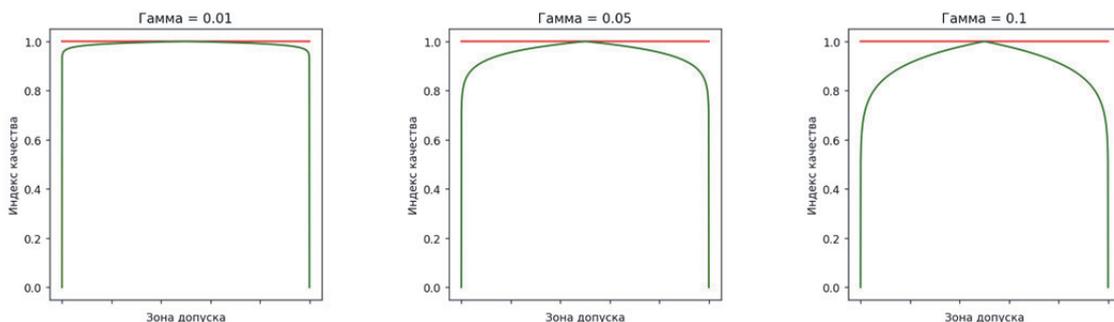


Рис. 10. Скорость убывания индекса качества при значениях 0.05, 0.1 и 0.5 параметра γ для интервального ограничения $a < p < b$

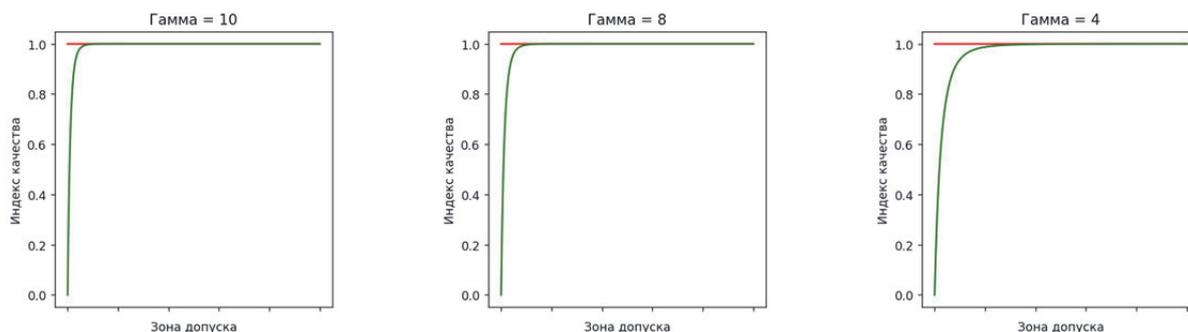


Рис. 11. Скорость убывания индекса качества при значениях 10, 8 и 4 параметра γ для лучевого ограничения вида $a \leq p$

В результате вычислений, применяя функцию $N(p)$ к каждой компоненте вектора \hat{Q} , получаем окончательный результат – вектор $q \in [0, 1]^m$, каждая компонента которого является индексом качества по показателю:

$$q = \begin{pmatrix} N(\rho(P_1)) \\ N(\rho(P_2)) \\ \dots \\ N(\rho(P_n)) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

На основе изложенного метода достаточно просто создать алгоритм для компьютерной программы. Она будет позволять пользователю добавлять и настраивать показатели качества, указывая название показателя, единицы измерения показателя, тип ограничений показателя, сами ограничения показателя и параметр γ убывания индекса качества. Настроив все необходимые показатели, по которым пользователь считает необходимым проводить сравнение между нормативными требованиями и фактическими значениями оцениваемого эксплуатируемого участка полимерного армированного трубопровода, пользователь сможет вводить измерения состояния труб/отводов/соединений по каждому показателю. Ввод таких данных может осуществляться автоматическим программным образом из результатов диагностики. Введенные данные обрабатываются методом ВИК и на экран выводится векторный индекс качества по оцениваемому участку. Например, можно будет установить, что если по участку зафиксирован уровень качества в 0,95 – то участок работоспособен и соответствует всем требованиям. Если по участку зафиксирован уровень в 0,82 – то можно говорить, что есть либо «объекты», либо «параметры» по которым состояние оцениваемого участка приближается к критической зоне. Здесь можно раскрыть и посмотреть сформированную матрицу $n * m$ и уже по ее внутренним данным судить, о том, что привело к снижению общего значения – высокие отклонения в каких либо конкретных трубах/отводах/соединениях, либо общая деградация по какому-либо из параметров. В случае же, если все показатели ма-

трицы приведут к значению менее 0,8 (данное граничное значение также может быть подстроено), то общий показатель выйдет в 0. Это в свою очередь будет сигнализировать, что либо какой-то один элемент (труба/отвод/соединение) находится в ненормативном состоянии, либо по ряду элементов участка значение какого-то из параметров вышло за поле допуска. Детали этого можно будет также узнать в формируемой матрице. В целях аналитики такая программа будет сохранять данные после каждого вычисления вектора индекса качества и предоставлять графики изменений индексов качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная проблематика в настоящее время, является крайне острой и актуальной в связи со значительными потребностями отечественной промышленности в полимерных армированных трубах. В виду отсутствия точных методов оценки их качества и технического состояния в период эксплуатации тормозится развитие данного направления и в целом их применение в различных сферах (нефтегазодобыча, использование в системах транспорта агрессивных жидкостей, тепломагистральных, на процессах обогащения). В результате приоритетным вопросом становится не только создать соответствующий комплекс диагностических методов, но и разработать специальную методику обработки получаемой информации и формирования на ее основе заключения о качестве эксплуатируемой полимерной армированной трубы.

По итогам проведенного исследования была предложена детальная систематика полимерных армированных труб, их соединений и отводов. Проанализированы международные, иностранные и российские стандарты на данное оборудование. На их основе сформированы системы показателей качества, для самих труб, соединений и отводов. Системы показателей составлены с учетом требований квалитметрии, а также им был придан вид открытых

списков, позволяющих осуществлять редактирование и дополнение. Все данные, требующиеся для наполнения разработанных систем и последующего контроля качества полимерных армированных труб и сопутствующих отводов и соединений в ходе эксплуатации, могут быть получены либо из документации на оборудование, либо путем замера внешних и внутренних параметров среды, либо при проведении неразрушающего контроля. В качестве методов получения информации при неразрушающем контроле предлагается использовать радиографию, а при невозможности ее применения сочетание ультразвукового, магнитометрического, вихревого и оптического методов внутритрубной диагностики.

Для обработки массива данных, включающего, с одной стороны, нормативные требования, а, с другой стороны, фактические показатели, оптимальным представляется не использование классических методов по оценке качества (дифференциального, комплексного, смешенного), а использование описанного метода векторного индекса качества (ВИК).

Метод ВИК является чувствительным к сбросам в ряде измерений каждого из показателей, благодаря тому, что в качестве агрегированного значения каждого показателя берется наихудшее, с точки зрения, нормативных требований. При этом, настраиваемый параметр γ в функциях свертки $N(p)$ позволяет устанавливать оптимальную скорость убывания показателей на основе индивидуальных требований исследователей. Векторный характер индекса позволяет определить, какой конкретно показатель требует внимания, а какие показатели находятся в зоне допуска.

На основе метода ВИК возможно сформировать алгоритм компьютерной программы, которая позволит пользователю добавлять интересующие его показатели, вводить данные наблюдений по этим показателям и получать рассчитанный вектор индекса качества. При добавлении показателей пользователю достаточно ввести название показателя, единицы его измерения, тип ограничений и граничные значения этих ограничений на основе нормативных требований. Также программное обеспечение будет предоставлять аналитику в виде графика изменений индекса качества в динамике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кершенбаум, В.Я. Методические основы выбора показателей качества структурных элементов сложных технических систем для нефтегазового комплекса – базовая основа их стандартизации / В.Я. Кершенбаум, О.О. Штырев // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 5. С. 58–62.
2. Роговина, С.З. Композиционные материалы на основе синтетических полимеров, армированных волокнами природного происхождения / С. З. Роговина, Э. В. Прут, А. А. Берлин // Высокмолекулярные соединения. Серия А. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 291–315. – DOI 10.1134/S2308112019040084. – EDN CNONAV.
3. Кимельблат, В. Актуальные положения экспертизы полиэтиленовых трубопроводов / В. Кимельблат // Полимерные трубы. – 2006. – № 1(10). – С. 42–48. – EDN ZMYMWT.
4. Lee L.S., Estrada H. Time-dependent probability analysis of fiber-reinforced polymer rehabilitated pipes // Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites. – Woodhead Publishing, 2015. – С. 79–100.
5. Cao J. et al. Integrity management of non-metallic pipeline // International Petroleum and Petrochemical Technology Conference. – Singapore : Springer Singapore, 2020. – С. 664–673.
6. Escuer C., Mahieu C., Sicsic P. Dynamic integrity management of flexible pipe through condition performance monitoring // Offshore Technology Conference Asia. – OTC, 2018. – С. D031S023R001.
7. Yu K. et al. A review of the design and analysis of reinforced thermoplastic pipes for offshore applications // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2017. – Т. 36. – №. 20. – С. 1514–1530.
8. Hassen A.A., Vaidya U.K., Britt F. Structural integrity of fiber reinforced plastic piping // Materials Evaluation. – 2015. – Т. 73. – №. 7.
9. Wasco P. et al. Proper tools and techniques for the inspection, structural observation, and field quality control of hand-applied fiber reinforced polymer (FRP) pipeline rehabilitation systems // Pipelines 2016. – 2016. – С. 1766–1774.
10. Ebeid S., Taha I., Abdel-Ghany A.W. Failure prediction of fiber reinforced polymer pipes using fea // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR). – 2016.
11. Tyncherov K.T., Selivanova M.V. Modular wavelet approach for reinforced plastic pipelines operation quality evaluation // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – С. 1–4.
12. Морозов, В.Б. Аналитическая методика выбора планов непрерывного статистического контроля качества / В.Б. Морозов, А.С. Горелов, Е.А. Саввина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 10. – С. 530–533. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-530-533. – EDN JUOGAO.
13. Овсянников, А.А. Методика контроля качества труб из полимерных композиционных материалов, совмещенная с измерением модуля продольной упругости / А.А. Овсянников, В.А. Абанин, И.И. Савин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 4(20). – С. 237–241. – EDN YLBLGI.
14. Овсянников, А.А. Автоматизация контроля технологических процессов производства и испытаний труб из полимерных композиционных материалов / А.А. Овсянников, В.А. Абанин, И.И. Савин // Датчики и системы. – 2016. – № 7(205). – С. 65–69. – EDN WIMDXV.
15. Масютина, Е.У. Адгезия как показатель оценки качества внутреннего полимерного покрытия нефтепромысловых труб / Е. У. Масютина, Е.

- М. Ловцова // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – № 6(52). – С. 6-9. – EDN VDGQGR.
16. Степанов, И.В. Управление качеством при эксплуатации сложных технических систем / И.В. Степанов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2006. – № 4. – С. 41-45. – EDN THJGBH.
17. Systems reliability: statistical analysis and applications / L. Papić, Yu. Klochkov, J. Aronov, A. Gaz-izulina. – Belgrad : The Research Center of Dependability and Quality Management DQM, 2022. – 164 p. – ISBN 978-86-86355-50-8. – EDN NDPNPV.
18. Ahmed O. et al. Advancements in fiber-reinforced polymer composite materials damage detection methods: Towards achieving energy-efficient SHM systems //Composites Part B: Engineering. – 2021. – Т. 223. – С. 109136.
19. Chaki S., Krawczak P. Non-Destructive Health Monitoring of Structural Polymer Composites: Trends and Perspectives in the Digital Era //Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 21. – С. 7838.
20. Горovenko, В. А. Теоретические основы и методы управления качеством продукции / В. А. Горovenko // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2020. – № 1(32). – С. 104-110. – EDN UADVKE.
21. Клочков, Ю.С. Учет неопределенности при проведении процедуры ФМЕА-анализа / Ю. С. Клочков, Г. А. Фокин, О. В. Сыровацкий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 6(104). – С. 26-32. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-6-26-32. – EDN XULUKO.
22. Klochkov, Y.S. Approaches to the improvement of quality management methods / Y. S. Klochkov, A. M. Tveryakov // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2020. – Vol. 11, No. Suppl. 2. – P. 163-172. – DOI 10.1007/s13198-019-00939-x. – EDN UFHZIV.
23. Мацюк, Р.А. Алгоритм оценки эффективности полимерных покрытий подземных трубопроводов по критерию контактной твердости / Р. А. Мацюк // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2021. – № 1(77). – С. 55-58. – EDN TZSBAR.
24. Шепилев, А.А. Анализ методик проведения расчета толщины стенки морских трубопроводов в соответствии с существующими нормативными документами / А. А. Шепилев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2021. – № 2(78). – С. 49-55. – EDN OXUZWT.
25. Леонович, И.А. Особенности сооружения морских трубопроводов на шельфе России / И.А. Леонович, Е.А. Сахневич // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2020. – № 4(76). – С. 27-32. – EDN OAJOPF.
26. Макарова, Т.А. Применение индуктивных измерительных систем при контроле качества деталей / Т. А. Макарова, Д. А. Грибанов // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. – 2010. – № 8. – С. 170-180. – EDN NCDTFR.
27. Петровский, Э.А. Управление качеством производственных и технологических систем : Учебник / Э. А. Петровский. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2022. – 352 с. – EDN KXNQKI.

**DEVELOPMENT OF QUALITY CRITERIA SYSTEMS
FOR POLYMER REINFORCED PIPES AND THEIR CONNECTIONS. QUESTIONS
OF MATHEMATICAL PROCESSING OF THESE INDICATORS**

© 2024 P.S. Shcherban

JSC VNIIST, Moscow, Russia
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Quality management of polymer reinforced pipes of various types, especially at the operation stage, remains a poorly studied area since it requires complex research involving application of powerful mathematical tools, physical and chemical tests of a number of materials and the development of appropriate methods and software. At the same time, the basis for the research should be a system of quality criteria for each type of reinforced polymer pipes and their connections. Quality criteria are essentially standards for the indicators of consumer properties of the structural components of indivisible elements of technical systems (in this case, reinforced polymer pipes of various types and their structural elements) in the initial state and under external influences at different stages of the life cycle. Focusing on deviations of actual indicators from the initially established ones and the degree of their admissibility, it is possible to assess the current state of the technical system, and, therefore, determine the possibility of its further operation, identify associated risks and, in general, develop a quality management loop through additional maintenance, repairs or other measures. In the study, we will classify the types of polymer reinforced pipes available on the market and create a system of quality criteria for each type of pipe. This will serve as the necessary basis for subsequent research and will allow the development of methods for assessing the technical condition and quality management of operating polymer reinforced pipes.

Keywords: polymer reinforced pipes, quality criteria, regulatory framework, defects, quality management.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-80-95

EDN: IBRCNE

REFERENCES

1. *Kershenbaum, V.Ya.* Metodicheskie osnovy vybora pokazatelej kachestva strukturnykh elementov slozhnykh tekhnicheskikh sistem dlya neftegazovogo kompleksa – bazovaya osnova ih standartizacii / V.Ya. Kershenbaum, O.O. SHtyrev // *Territoriya «NEFTEGAZ»*. 2017. № 5. S. 58–62.
2. *Rogovina, S. Z.* Kompozicionnye materialy na osnove sinteticheskikh polimerov, armirovannykh voloknami prirodnoho proiskhozhdeniya / S. Z. Rogovina, E. V. Prut, A. A. Berlin // *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*. – 2019. – T. 61, № 4. – S. 291-315. – DOI 10.1134/S2308112019040084. – EDN CNONAV.
3. *Kimel'blat, V.* Aktual'nye polozeniya ekspertizy polietilenovykh truboprovodov / V. Kimel'blat // *Polimernye truby*. – 2006. – № 1(10). – S. 42-48. – EDN ZMYMWT.
4. *Lee L. S., Estrada H.* Time-dependent probability analysis of fiber-reinforced polymer rehabilitated pipes // *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*. – Woodhead Publishing, 2015. – S. 79-100.
5. *Cao J. et al.* Integrity management of non-metallic pipeline // *International Petroleum and Petrochemical Technology Conference*. – Singapore : Springer Singapore, 2020. – S. 664-673.
6. *Escuer C., Mahieu C., Sicsic P.* Dynamic integrity management of flexible pipe through condition performance monitoring // *Offshore Technology Conference Asia*. – OTC, 2018. – S. D031S023R001.
7. *Yu K. et al.* A review of the design and analysis of reinforced thermoplastic pipes for offshore applications // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2017. – T. 36. – № 20. – S. 1514-1530.
8. *Hassen A.A., Vaidya U.K., Britt F.* Structural integrity of fiber reinforced plastic piping // *Materials Evaluation*. – 2015. – T. 73. – № 7.
9. *Wasco P. et al.* Proper tools and techniques for the inspection, structural observation, and field quality control of hand-applied fiber reinforced polymer (FRP) pipeline rehabilitation systems // *Pipelines* 2016. – 2016. – S. 1766-1774.
10. *Ebeid S., Taha I., Abdel-Ghany A.W.* Failure prediction of fiber reinforced polymer pipes using fea // *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*. – 2016.
11. *Tyncherov K.T., Selivanova M.V.* Modular wavelet approach for reinforced plastic pipelines operation quality evaluation // *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – IEEE, 2017. – S. 1-4.
12. *Morozov, V.B.* Analiticheskaya metodika vybora planov nepreryvnogo statisticheskogo kontrolya kachestva / V. B. Morozov, A. S. Gorelov, E. A. Savvina // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. – 2022. – № 10. – S. 530-533. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-530-533. – EDN JUOGAO.
13. *Ovsyannikov, A.A.* Metodika kontrolya kachestva trub iz polimernykh kompozicionnykh materialov, sovmeshchennaya s izmereniem modulya prodol'noj uprugosti / A. A. Ovsyannikov, V. A. Abanin, I. I. Savin // *Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*. – 2017. – № 4(20). – S. 237-241. – EDN YLBLGI.
14. *Ovsyannikov, A.A.* Avtomatizaciya kontrolya tekhnologicheskikh processov proizvodstva i ispytaniy trub iz polimernykh kompozicionnykh materialov / A. A. Ovsyannikov, V. A. Abanin, I. I. Savin // *Datchiki i sistemy*. – 2016. – № 7(205). – S. 65-69. – EDN WIMDXV.
15. *Masyutina, E.U.* Adgeziya kak pokazatel' ocenki kachestva vnutrennego polimernogo pokrytiya neftepromyslovykh trub / E. U. Masyutina, E. M. Lovcova // *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika*. – 2015. – № 6(52). – S. 6-9. – EDN VDGQGR.
16. *Stepanov, I. V.* Upravlenie kachestvom pri ekspluatcii slozhnykh tekhnicheskikh sistem / I. V. Stepanov // *Izvestiya SPbGETU LETI*. – 2006. – № 4. – S. 41-45. – EDN THJGBH.
17. *Systems reliability: statistical analysis and applications / L. Papic, Yu. Klochkov, J. Aronov, A. Gaz-izulina*. – Belgrad : The Research Center of Dependability and Quality Management DQM, 2022. – 164 p. – ISBN 978-86-86355-50-8. – EDN NDPNPV.
18. *Ahmed O. et al.* Advancements in fiber-reinforced polymer composite materials damage detection methods: Towards achieving energy-efficient SHM systems // *Composites Part B: Engineering*. – 2021. – T. 223. – S. 109136.
19. *Chaki S., Krawczak P.* Non-Destructive Health Monitoring of Structural Polymer Composites: Trends and Perspectives in the Digital Era // *Materials*. – 2022. – T. 15. – № 21. – S. 7838.
20. *Gorovenko, V.A.* Teoreticheskie osnovy i metody upravleniya kachestvom produkcii / V. A. Go-rovenko // *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. – 2020. – № 1(32). – S. 104-110. – EDN UADVKF.
21. *Klochkov, Yu. S.* Uchet neopredelennosti pri provedenii procedury FMEA-analiza / Yu. S. Klochkov, G. A. Fokin, O. V. Syrovacskij // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2021. – T. 23, № 6(104). – S. 26-32. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-6-26-32. – EDN XULUKO.
22. *Klochkov, Y.S.* Approaches to the improvement of quality management methods / Y.S. Klochkov, A.M. Tveryakov // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. – 2020. – Vol. 11, No. Suppl. 2. – P. 163-172. – DOI 10.1007/s13198-019-00939-x. – EDN UFHZIV.
23. *Macyuk, R.A.* Algoritm ocenki effektivnosti polimernykh pokrytij podzemnykh truboprovodov po kriteriyu kontaktnoj tverdosti / R.A. Macyuk // *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika*. – 2021. – № 1(77). – S. 55-58. – EDN TZSBAR.
24. *Shepilev, A.A.* Analiz metodik provedeniya rascheta tolshchiny stenki morskikh truboprovodov v sootvetstvii s sushchestvuyuschimi normativnymi dokumentami / A. A. SHepilev // *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika*. – 2021. – № 2(78). – S. 49-55. – EDN OXUZWT.
25. *Leonovich, I.A.* Osobennosti sooruzheniya morskikh truboprovodov na shel'fe Rossii / I. A. Leonovich, E. A. Sahnevich // *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika*. – 2020. – № 4(76). – S. 27-32. – EDN OAJOPF.
26. *Makarova, T.A.* Primenenie induktivnykh izmeritel'nykh sistem pri kontrole kachestva detalej / T.A. Makarova, D. A. Gribanov // *Vestnik INZHEKONa. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. – 2010. – № 8. – S. 170-180. – EDN NCDTFR.
27. *Petrovskij, E.A.* Upravleniekachestvomproizvodstvennyh i tekhnologicheskikh sistem: Uchebnik / E.A. Petrovskij. – 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. – Staryj Oskol : OOO «Tonkie naukoemkie tekhnologii», 2022. – 352 s. – EDN KXNQKI.

*Pavel Shcherban, Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher at JSC VNIIST, Associate Professor of the Branch Scientific Cluster «Institute of High Technologies» of the Immanuel Kant Baltic Federal University.
E-mail: ursa-maior@yandex.ru*