

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 697.343

И. А. Леонович, А. А. Александриков, В. В. Титов

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПИ-ТРУБ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

UDC 697.343

I. A. Leonovich, A. A. Aleksandrikov, V. V. Titov

ANALYSIS OF MAIN FACTORS OF PRODUCTION THAT PROVIDE DURABILITY OF PRE-INSULATED PIPES FOR HEAT SUPPLY NETWORKS

Аннотация

Продление срока службы труб теплофикационных сетей является крайне важной задачей. В статье представлен анализ стадий производства предварительно изолированных труб, начиная от выбора материала и заканчивая контролем качества произведенной продукции. Для определения значимости факторов, от которых в наибольшей степени зависит долговечность тепловых сетей, использован метод анализа иерархий (МАИ).

Ключевые слова:

предварительно изолированные трубы, тепловые сети, пенополиуретановая теплоизоляция, полиэтиленовая оболочка, герметичность, нормализованный вектор приоритетов, матрица попарных сравнений.

Abstract

The extension of service life of heat network pipes is an extremely important task. The paper presents the analysis of production stages of pre-insulated pipes, starting with the choice of material and ending with the quality control of finished products. The hierarchy analysis method (HAM) is used to determine the significance of factors on which the durability of heat supply networks depends most.

Key words:

pre-insulated pipes, heat supply networks, polyurethane foam insulation, polyethylene jacket, impermeability, normalized priority vector, pairwise comparison matrix.

Введение

Отличительной особенностью современных предварительно изолированных труб (ПИ-труб) является объединение в единую монолитную конструкцию проводящей трубы, слоя теплоизоляции и защитной оболочки.

В большинстве случаев труба, по которой доставляется теплоноситель, выполняется из стали. В качестве тепловой изоляции используется вспененный полиуретан (пенополиуретан – ППУ). Материалом защитной оболочки служит полиэтилен высокой плотности или

тонколистовая оцинкованная сталь в зависимости от вида прокладки трассы (подземная или надземная). В слое теплоизоляции размещаются провода системы оперативного дистанционного контроля (СОДК) для фиксации и локализации места намокания пенополиуретана при протечке трубы.

Замена традиционных труб с навесной изоляцией на ПИ-трубы повышает надежность теплоснабжения, позволяет снизить потери при транспортировке тепловой энергии, затраты на эксплуатацию и ремонт тепловых сетей и осуществлять непрерывный контроль за состоянием изоляции. В рамках общей политики увеличения энергетической эффективности Советом Министров Республики Беларусь было принято Постановление № 1820 от 27.12.2002 г. о строительстве, реконструкции и капитальном ремонте тепловых сетей и систем теплоснабжения с применением только предварительно изолированных труб. При соблюдении технологии прокладки теплотрасс срок службы качественных ПИ-труб составляет не менее 25 лет, и ставится задача довести его до 30 лет и более.

Основным направлением исследования в представленной работе является поиск путей повышения долговечности предварительно изолированных труб при их производстве. Для определения значимости факторов, от которых в наибольшей степени зависит долговечность тепловых сетей, использован метод анализа иерархий (МАИ). В исследовании не учитывался уровень финансовых затрат предприятия при выборе исходных материалов и оборудования, т. к. часто стремление увеличить рентабельность производства не совпадает с требованиями долговременного качества продукции.

На этапе отбора и систематизации факторов, влияющих на качество трубы, использовалась информация из [1–13], включая нормативные документы, и опыт производства труб на предприяти-

ях ЗАО «Завод полимерных труб» (г. Могилев) и ООО «СМИТ-Ярцево» (г. Ярцево Смоленской области).

Выделены наиболее весомые факторы, объединенные в две группы: *выбор исходного материала и процесс производства*.

Исходные материалы

Основную задачу по обеспечению герметичности выполняет *внутренняя стальная труба*, материал которой должен обладать набором характеристик, обеспечивающих его коррозионную и механическую стойкость при использовании в тепловых сетях с максимальной температурой воды в 160 °С при возможных гидравлических ударах. Отказы трубопроводов вызываются совместным действием механической и термоусталости и коррозионно-активной среды. Цикличность в последующей эксплуатации трубопровода связана с изменением величины эксплуатационных нагрузок и температуры носителя. Не допускаются к применению в тепловых сетях трубы со сварными поперечными соединениями или спиральным швом [1–3].

При строительстве трубопроводов используют трубы из углеродистых и низколегированных сталей. Механические дефекты труб могут быть в исходной заготовке, возникать при изготовлении труб на заводе, в процессе транспортировки и хранения. Они проявляются в виде микротрещин, пятен ржавчины, остаточных деформаций, искривленности, овальности труб, гофр, возникающих при пластической деформации. Язвенная коррозия труб может оказаться причиной зарождения усталостных трещин и хрупких разрушений. Сплошная равномерная коррозия, которая развивается с меньшей скоростью, не так опасна. При эксплуатации поверхностные дефекты развиваются во времени и, если глубина проникновения коррозионного или механического по-

вреждения равна толщине стенки трубы, труба разгерметизируется даже при отсутствии давления.

Развитие локальной и общей внутренней коррозии в значительной мере зависит от коррозионной стойкости сталей, применяемых для изготовления труб, и определяется чистотой металла по коррозионно-активным неметаллическим включениям. Гидравлические удары при проведении гидравлических испытаний могут привести к коррозионному растрескиванию около этих скоплений и развитию микротрещин [5].

Значительное количество аварий происходит из-за использования труб, уже бывших в употреблении [6]. В процессе длительной эксплуатации стальных трубопроводов в трубах накапливаются повреждения, связанные с деформационным старением. Общее количество циклов за нормативный срок службы трубопровода составляет около $8 \cdot 10^4$, что может вызвать разрушение даже новых труб. Бывшие в употреблении трубы уже прошли начальные процессы накопления повреждений и образования микротрещин. В новых жестких условиях напряженного и температурного нагружения завершающая стадия усталостного процесса развивается ускоренно. Эти процессы вызывают снижение пластичности металла, степень которого зависит от продолжительности эксплуатации труб. В дальнейшем при сварке таких труб в зоне термического влияния активизируются структурные превращения, снижающие работоспособность сварных соединений [6].

В качестве *тепловой изоляции* в ПИ-трубах используется вспененный полиуретан (пенополиуретан – ППУ), который обладает низкой теплопроводностью, адгезивной прочностью сцепления со стальной трубой и наружной оболочкой и термостойкостью. Последние качества оказывают значительное влияние на долговечность трубы в целом. Отслоение пены или её разрушение от температурного воздействия приво-

дит к образованию полостей внутри трубы. При отрицательных температурах наружного воздуха высока вероятность образования конденсата в этих полостях, что приводит к намоканию пены. При этом начинается процесс гидролиза пенополиуретана с образованием коррозионно-активных веществ (растворы карбоновых кислот). В результате начинает прогрессировать наружная коррозия на металлической трубе, которая распространяется с неконтролируемой скоростью.

К пенополиуретану в составе ПИ-трубы предъявляется ряд требований по нормативным документам РБ [1, 2]. Изоляционный материал в трубе работает в основном на сжатие, а не на растяжение, но может подвергаться также изгибающим или сдвиговым напряжениям. Пенополиуретан должен иметь однородную структуру. Средний размер ячеек в радиальном направлении должен быть не более 0,5 мм. Пустоты не должны уменьшать толщину термоизоляции более чем на 1/3 от ее номинальной толщины. Количество закрытых пор в пенополиуретане – не менее 82 %. Кажущаяся плотность термоизоляции должна быть более 60 кг/м^3 , водопоглощение по объему после кипячения в течение 90 мин в дистиллированной воде – не более 10 %. Теплопроводность λ жесткого пенополиуретана не должна превышать $0,033 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Основные из ранее применявшихся пенообразователей – фреоны – были запрещены для производства из-за их отрицательного влияния на озоновый слой. Юридические ограничения заставили производителей жестких пенопластов рассматривать другие альтернативные варианты, например водные или углеводородные вспениватели, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Перечисленным ранее требованиям соответствуют трубы с теплоизоляцией на основе циклопентана, которые обладают такими преимуществами, как уменьшенный коэффициент теп-

лопроводности $0,027 \text{ Вт/(м·К)}$ в сравнении с пенами на основе водных вспенивателей ($0,033 \text{ Вт/(м·К)}$), более высокие адгезивные свойства к трубе и оболочке, стабильные теплофизические параметры пены на протяжении всего срока эксплуатации трубопровода (30 лет), соответствие требованиям экологии [7]. Только немногие производители ПИ-труб используют циклопентан в качестве пенообразователя, т. к. требуется серьезное переоборудование производства из-за его высокой горючести.

В качестве материала для защитной оболочки ПИ-труб применяется полиэтилен высокой плотности (ПНД, HDPE), получаемый реакцией полимеризации этилена при низком давлении, что обусловлено его физико-химическими характеристиками: высокой твердостью и прочностью, паро- и водонепроницаемостью, хорошей химической стойкостью по отношению к большинству агрессивных сред с содержанием кислот, щелочей, жиров и масел, отличными диэлектрическими свойствами [1–4].

Полиэтилен высокой плотности обладает достаточной стойкостью к растрескиванию и механическим воздействиям. Однако в условиях низких минусовых температур при силовом воздействии на полиэтиленовую оболочку возможен эффект «быстрого распространения трещин» или хрупкое разрушение. Это связано с возникновением комбинации напряжений от внутреннего давления пены и температурного сжатия. Чувствительность оболочки к данному эффекту возрастает с увеличением толщины стенки.

По нормативным документам РБ, трубы-оболочки изготавливают методом экструзии из полиэтилена марок не ниже ПЭ80, имеющего показатель текучести расплава не более $1,2 \text{ г/10 мин}$ [4]. При изготовлении оболочек допускается добавка недеградированного, чистого вторичного полиэтилена тех же марок, но не более 5 % по массе, образующегося

на собственном производстве завода-изготовителя. Плотность полиэтилена должна быть не менее 930 кг/м^3 , содержание сажи – $(2,5 \pm 0,5) \%$ по массе. На наружной и внутренней поверхности, а также по торцу труб не допускаются пузыри, раковины, вздутия, любые посторонние включения, видимые без применения увеличительных приборов, а также следы термического разложения материала. Относительное удлинение полиэтилена при разрыве должно быть не менее 350 % [4].

В результате отбора в первую группу «Исходный материал» вошло 10 факторов: коррозионная стойкость стали; толщина стенки стальной трубы; наличие спиральных и поперечных сварных швов в трубе; применение труб, бывших в употреблении; наличие в трубе микротрещин и коррозии; вид вспенивателя для ППУ; качество компонентов ППУ; толщина стенки внешней оболочки; марка полиэтилена; применение вторичного сырья для оболочки.

Процесс производства труб

Технологический процесс изготовления ПИ-труб реализуется на производственной поточно-механизированной линии.

Поверхность трубы, поступающей с металлургического завода, покрыта слоем окалины, состоящей преимущественно из оксида FeO . При длительном хранении образуется ржавчина, состоящая из оксидов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и содержащая гидроксид $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и воду. На поверхности возможны другие загрязнения, например масляные. Окалина, как и ржавчина, является ненадежным основанием для пенополиуретана, т. к. имеет отличающийся от стали коэффициент температурного расширения и при смене температур может отслаиваться от стали. Для обеспечения связи стали с пенополиуретановой теплоизоляцией необходима тщательная очистка поверхности трубы (до класса Sa3 по

ISO 8501–1:2007) [8].

При подготовке наружной поверхности стальных труб используются дробеструйная или дробеметная обработка, щеточная очистка, обработка пламенем или химическими реагентами. Только дробеструйная или дробеметная обработка обеспечивает требуемое качество поверхности и максимальную прочность сцепления пены с трубой. Между поверхностной обработкой и заливкой компонентов полиуретановой пены необходим минимальный перерыв, т. е. труба должна очищаться на непрерывно действующей линии производства.

Внутренняя поверхность полиэтиленовой трубы-оболочки также должна обрабатываться для обеспечения достаточной адгезии с пенополиуретаном.

Прочность связи между поверхностью полимерных материалов и пенополиуретаном зависит от величины поверхностной энергии [8]. Среди пластмасс самую низкую поверхностную энергию имеют полиэтилен и полипропилен. Очистка внутренней поверхности трубы-оболочки с помощью различных растворителей, обезжиривание, травление, обработка горячим воздухом или пламенем благоприятно сказываются на адгезионной прочности, но недостаточны для обеспечения прочной связи с пенополиуретаном. Рекомендуется производить обработку поверхности полиэтилена коронным разрядом. Поверхность приобретает уникальные свойства, возрастает её поверхностная энергия, она становится «шероховатой» на молекулярном уровне. Уровень активации очень быстро падает в начальный период хранения материала, причём скорость спада для труб с более высоким уровнем обработки выше. Поэтому при затягивании процесса сборки трубы может понадобиться повторная обработка коронным разрядом.

Очищенная металлическая труба помещается на сборочный стенд. Здесь на стальную трубу одеваются центри-

рующие опоры (центраторы). Они обеспечивают регламентируемый конструкцией зазор между трубой и оболочкой. Их количество рассчитывается в зависимости от веса стальной трубы, они располагаются с равномерным шагом 0,7...1 м. При установке центраторов не допускаются перекосы, т. к. они могут изменить положение проводов СОДК и вызвать пустоты в теплоизоляции [1].

По всей длине стальной трубы с двух или более сторон через ушки центраторов пропускаются провода СОДК из неизолированной мягкой меди марки ММ, сечением 1,5 мм², ориентированные по прямой линии. Во время запенивания сигнальные провода должны проходить в межтрубном пространстве строго эквидистантно оси стальной трубы без провисания, т. к. может образоваться брак – закорачивание сигнального провода СОДК на трубу.

Подготовленная стальная труба (одеты центраторы, протянут провод СОДК) помещается в полиэтиленовую оболочку. Для этого применяется траповое тянущее устройство. Подающим конвейером собранная труба помещается в камеру для термостатирования, которое необходимо для обеспечения протекания процесса формирования пенополиуретановой теплоизоляции и получения стабильных показателей связи пены со стальной трубой и оболочкой. Тепловентиляторы подают поток горячего воздуха вовнутрь стальной трубы. Обратный поток идёт по пространству между наружной поверхностью стальной трубы и внутренней поверхностью оболочки.

Далее на торцы полученной конструкции «труба в трубе» устанавливаются заливочные заглушки, при этом в межтрубном пространстве создается герметичная полость для заполнения пенополиуретаном. На этом этапе собранные трубы с заглушками подготовлены к запениванию.

Пенообразователь может быть за-

ранее перемешан с полиолом или же добавлен в смеситель или смесительную головку под давлением.

Соблюдение режимов запенивания является необходимым условием обеспечения адгезии пенополиуретана к стальной трубе и оболочке. Основными требованиями являются точное дозирование компонентов, качественное смешивание и поддержание необходимой температуры (20...23 °С). Соответственно, трубы должны быть, особенно в зимнее время, обязательно прогреты до этой температуры. В противном случае будет происходить слишком быстрая потеря тепла пеной, что приведет к недостаточной реакционной способности на границе пены и трубы и, как следствие, к слабой адгезии пены к трубе. Расход пены заливочной машиной должен быть таким, чтобы расчетное количество смешанных компонентов было введено в трубу за время старта системы. Минимальный объем заполнения должен быть достаточно большим, чтобы пена заполнила трубу до начала нитеобразования, иначе ячейки пены будут вытянутыми. Это приведет к плохим механическим свойствам пены на концах трубы.

Типовое соотношение полиола к изоцианату 1:2. Так как соотношение компонентов определяет будущие характеристики полимера, процесс дозирования должен быть тщательно контролирован. На современном оборудовании это осуществлено с помощью компьютеризированной панели управления [7].

В зависимости от положения трубы в процессе заливки вспенивающихся компонентов различают технологии заливки снизу, сверху и по центру. Технология заливки может осуществляться с постоянным положением заливочной головки или с движущейся головкой. Заливочные машины могут быть высокого и низкого давления. Более совершенными являются установки высокого давления. В них компоненты подаются

в смесительную камеру под давлением около 10 МПа (100 атм). Установки высокого давления обеспечивают использование современных вспенивающих агентов, качественное смешивание компонентов и высокую производительность. Возможность применения того или иного способа заливки зависит от конкретного производителя [9].

Заполненные композицией трубы выдерживаются до отверждения пены. После заливки оператор запускается таймер, устанавливающий время выдержки, по истечении этого времени заглушки снимаются.

Затем производится температурная стабилизация ПИ-трубы. Она заключается в выдержке при температуре 20...25 °С в течение 24 ч для завершения процессов формирования теплоизоляции. Только после термической обработки труба маркируется и отправляется на склад или отгружается заказчику.

В результате анализа во вторую группу «Процесс производства» вошло шесть факторов: сушка и очистка поверхности стальной трубы; подготовка внутренней поверхности оболочки; качество сборки (соосность труб и проводников СОДК); качество запенивания (способ, дозировка, температура); температурно-влажностные условия отверждения пены; уровень технического контроля качества этапов производства.

Оценка значимости факторов

Для оценки значимости разнородных факторов, влияющих на достижение поставленной цели (качество ПИ-труб), использован метод анализа иерархий (МАИ), основанный на аддитивной свертке, который позволяет не только найти наилучшее решение, но и оценить его достоверность [13–15]. Методика включает в себя рассмотрение уже имеющейся информации, связанной с областью исследования. При этом будет наблюдаться прямая зависимость между объемом доступной информации

(количеством найденных факторов) и адекватностью дальнейшей оценки.

На первом этапе исследований составляется матрица попарных сравнений факторов внутри каждой группы, на втором – вычисляется *нормализованный вектор приоритетов* (НВП) для каждого фактора, на третьем – проверяется согласованность составленной матрицы. Таким образом, по величине НВП выявляются те факторы, которые оказывают наибольшее влияние на долговечность ПИ-груб.

Инструментом расчета является матрица попарных сравнений отдельных факторов, элементы которой полу-

чены в результате присвоения лингвистической оценке относительной важности количественного значения [14]. Использование лингвистических оценок намного облегчает ранжирование факторов.

В лингвистической шкале 9 градаций (табл. 1), что связано с психофизическими особенностями человека как субъекта принятия решений и обработки информации. На практике чаще всего используются только нечетные оценки. При отсутствии каких-либо предпочтений между частными показателями $a_{ij} = 1$.

Табл. 1. Вербальные оценки относительной важности

Интенсивность важности	Количественная оценка a_{ij}
1	Равная важность
3	Умеренное превосходство
5	Значительное превосходство
7	Сильное превосходство
9	Очень сильное превосходство
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения важности

Оценка элемента j с элементом i (a_{ji}) имеет обратное значение к оценке a_{ij} . В итоге попарные оценки дают суммарный итог в виде коэффициентов относительной важности a_1, a_2, \dots, a_n .

Составляется соответствующая матрица $A\{a_{ij}\}$ для каждой группы факторов размером $n \times n$, которая получает-

ся обратно симметричной. Для каждой матрицы вычисляют множество собственных векторов с последующей нормализацией результата к единице.

Для вычисления собственных векторов определяется среднее геометрическое в каждой строчке матрицы:

$$\begin{aligned} a_1 &= \sqrt[n]{\text{произведение элементов } 1^{\text{й}} \text{ строки,}} \\ a_2 &= \sqrt[n]{\text{произведение элементов } 2^{\text{й}} \text{ строки,}} \\ &\dots \\ a_n &= \sqrt[n]{\text{произведение элементов } n^{\text{й}} \text{ строки.}} \end{aligned} \quad (1)$$

Вычисляется сумма средних геометрических значений матрицы:

$$\Sigma = a_1 + a_2 + \dots + a_n. \quad (2)$$

Нормализованный вектор приоритетов x_i определяется по формуле

$$x_i = \frac{a_i}{\sum} \quad (i = 1 \dots n). \quad (3)$$

Каждый компонент НВП представляет собой оценку важности соответствующего фактора. Сумма компонентов x_i равна единице.

Вербальные оценки относительно

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i=1}^n (\text{элементы } i\text{-го столбца}) x_i \right). \quad (4)$$

Рассчитывается индекс согласованности (ИС):

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (5)$$

Вычисляется отношение согласованности (ОС):

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{ПСС}}, \quad (6)$$

где ПСС – показатель случайной согласованности, определяемый теоретически для случая, когда оценки в матрице представлены случайным образом, и зависящий только от размера матрицы (табл. 2) [14, 15].

Табл. 2. Значения показателя случайной согласованности (ПСС)

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПСС	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Оценки в матрице считаются согласованными, если $\text{ОС} \leq 10 \dots 15 \%$, в противном случае их надо пересматривать.

В исследовании при попарном сравнении факторов оценивалась степень их влияния на долговечность труб (трубопровода) как в положительную, так и в отрицательную сторону.

Вершинный граф, построенный для группы «Исходный материал» (С1), показан на рис. 1.

Матрица попарных сравнений отдельных факторов группы С1 и ее характеристики (λ_{\max} , ИС и ОС) показаны на рис. 2.

Отношение согласованности (ОС)

составило 11 % от показателя случайной согласованности (ПСС), который для матрицы размером $n = 10$ равен 1,49 (см. табл. 2). Следовательно, оценки в матрице согласованы.

Анализ группы факторов «Исходные материалы» показал, что наибольшей значимостью обладают факторы Ф5, Ф4 и Ф1. Следовательно, при подготовке производства повышенной эффективностью обладают средства, вложенные в приобретение качественных стальных труб, которые в результате хранения и транспортировки не приобрели внутренних и внешних дефектов (НВП = 0,225) и которые не были в употреблении (НВП = 0,211), с высокой кор-

розионной стойкостью (НВП = 0,109). Факторы, отвечающие за выбор исходного материала для изоляции и оболоч-

ки, по результатам расчета обладают значительно меньшей значимостью для долговечности ПИ-трубы.

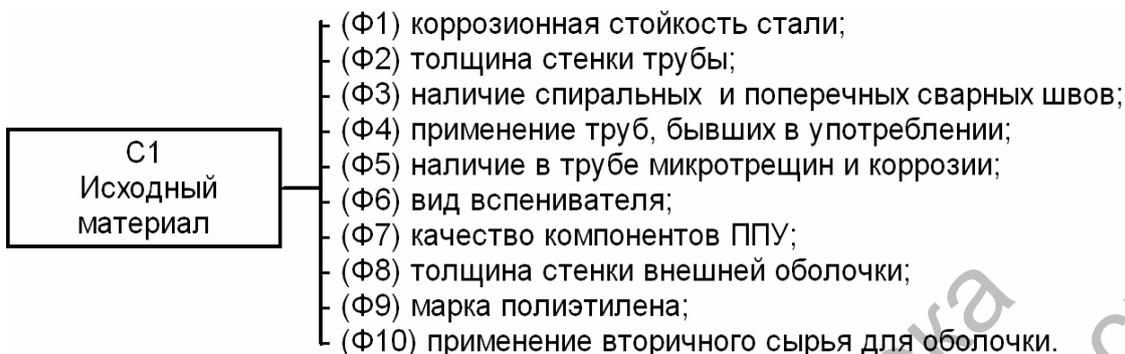


Рис. 1. Граф группы «Исходный материал»

Исходный материал

С1	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8	Ф9	Ф10	НВП
Ф1	1	2	2	1/5	1/2	3	3	2	3	1/2	0,109
Ф2	1/2	1	1/2	1/7	1/5	2	2	3	3	3	0,084
Ф3	1/2	2	1	1/5	1/7	2	2	1/2	1/2	1/2	0,056
Ф4	5	7	5	1	1/3	3	3	1	5	3	0,211
Ф5	2	5	7	3	1	2	2	3	3	2	0,225
Ф6	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1	1/2	1/2	2	0,052
Ф7	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1	3	1	1	0,062
Ф8	1/2	1/3	2	1	1/3	2	1/3	1	1	2	0,071
Ф9	1/3	1/3	2	1/5	1/3	2	1	1	1	1/2	0,056
Ф10	4	1/3	2	1/3	1/2	1/2	1	1/2	2	1	0,074

$\lambda_{\max} = 12,19$
 ИС = 0,24
 ОС = 0,16

Рис. 2. Матрица попарных сравнений факторов группы С1

Вершинный граф, построенный для группы «Процесс производства» (С2), показан на рис. 3.

Матрица попарных сравнений от-

дельных факторов группы С2 и ее характеристики (λ_{\max} , ИС и ОС) показаны на рис. 4.

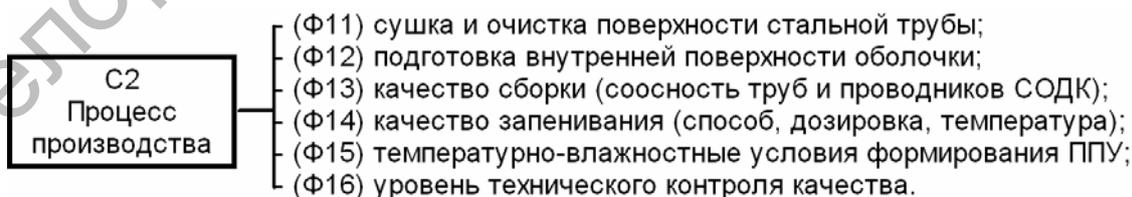


Рис. 3. Граф группы «Процесс производства»

Процесс производства							
C2	Ф11	Ф12	Ф13	Ф14	Ф15	Ф16	НВП
Ф11	1	1	2	1	2	1/5	0,155
Ф12	1	1	1/2	1/2	1/2	1/3	0,095
Ф13	1/2	2	1	1	2	2	0,202
Ф14	1	2	1	1	2	1/2	0,180
Ф15	1/2	2	1/2	1/2	1	2	0,143
Ф16	5	3	1/2	2	1/2	1	0,225

$\lambda_{\max} = 7,13$
 $ИС = 0,23$
 $ОС = 0,18$

Рис. 4. Матрица попарных сравнений факторов группы С2

Отношение согласованности (ОС) составило 14,7 % от показателя случайной согласованности (ПСС), который для матрицы размером $n = 6$ равен 1,24 (см. табл. 2). Следовательно, оценки в матрице согласованы.

Анализ группы факторов «Процесс производства» показал, что наибольшей значимостью для долговечности трубы обладают факторы Ф16, Ф13 и Ф14 в порядке убывания. На первом месте стоит уровень технического контроля качества на предприятии (НВП = 0,225). Из операций процесса производства наиболее значимыми оказались качество сборки (соосность труб и проводников СОДК) (НВП = 0,202) и качество запенивания (способ, дозировка, смешивание, температура) (НВП = 0,180).

Выводы

1. Наибольшую весомость в обеспечении долговечности трубопровода имеет стальная внутренняя труба. Выбор марки стали трубы следует производить с учетом коррозионной активности воды-теплоносителя в различных регионах.

2. Выбор исходных материалов для изоляции и защитной оболочки в боль-

шей степени регламентирован и оставляет меньшую возможность варьирования для производителей, поэтому весомость таких факторов оказалась значительно меньше. На экспертную оценку при составлении матрицы попарных сравнений повлияло также то, что при недостаточном качестве защитной оболочки и теплоизоляции герметичность в течение некоторого времени обеспечивается за счет стальной трубы.

3. Высокая долговечность теплоизоляции (более 25 лет) может быть обеспечена применением углеводородных вспенивателей (циклопентан и др.) при производстве пенополиуретана. Необходимо ускоренный переход на эти технологии всех производителей.

4. Химико-физические факторы создания слоя тепловой изоляции показали их высокую значимость, которая соизмерима со значимостью технологических факторов механической сборки системы «труба в трубе».

5. При производстве ПИ-труб наиболее значимым является уровень технического контроля качества на предприятии, т. к. грамотная организация этой службы должна обеспечить качественное выполнение всех операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТБ 2252–2012.** Трубы стальные, предварительно термоизолированные пенополиуретаном. Технические условия. – Минск : Госстандарт, 2012. – 38 с.
2. **СТБ 2270–2012.** Изделия стальные, предварительно термоизолированные пенополиуретаном. Общие технические условия. – Минск : Госстандарт, 2012. – 42 с.
3. **EN 253:2009.** Системы магистрального теплоснабжения. Предварительно изолированные сварные системы трубопроводов для подземных сетей горячего водоснабжения. Трубопроводы стальные в сборе с полиуретановой теплоизоляцией и наружной трубой из полиэтилена. – CEN/TC 107 «Prefabricated district heating pipe systems», 2009. – 54 с.
4. **СТБ 2251–2012.** Трубы-оболочки из полиэтилена для ПИ-труб и изделий к ним. Технические условия. – Минск : Госстандарт, 2012. – 8 с.
5. **Матвеев, В. И.** Определение состояния металла трубопроводов тепловых сетей по результатам обследования индикаторов коррозии и инженерной диагностики [Электронный ресурс] / В. И. Матвеев, С. Я. Алибекова // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 12 (88). – Режим доступа: http://www.nts.ru/12_2007.html. – Дата доступа: 16.01.2016.
6. Опасность применения труб, бывших в использовании, при производстве труб в ППУ изоляции / С. К. Павлюк [и др.] // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 11 (123). – С. 25–29.
7. **Шалыжин, К. А.** О преимуществах изделий в ППУ изоляции, изготовленных с применением циклопентана [Электронный ресурс] / К. А. Шалыжин // Новости теплоснабжения. – 2012. – № 9 (145). – Режим доступа: http://www.nts.ru/9_2012.html. – Дата доступа: 17.01.2017.
8. **Келлнер, Ю.** Способы производства полиуретановых предизолированных труб для систем центрального отопления [Электронный ресурс] / Ю. Келлнер // ПОЛИМЕР-СТРОЙ. – 2012. – Режим доступа: http://www.nny.ru/statyi_26_04_04.phtml. – Дата доступа: 12.03.2016.
9. **Иванов, С. А.** Вероятность гидравлического удара в системе теплоснабжения, причины и последствия / С. А. Иванов // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 2. – С. 44–46.
10. **Заглубоцкий, Н. З.** Трубы в пенополиуретановой изоляции. Пора решать проблемы [Электронный ресурс] / Н. З. Заглубоцкий, Г. В. Круталевич // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 4 (128). – Режим доступа: http://www.nts.ru/4_2011.html. – Дата доступа: 17.01.2017.
11. Надежность и энергоэффективность тепловых сетей [Электронный ресурс] // «Энергосовет». – 2010. – № 7 (12). – Режим доступа: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?num=12. – Дата доступа: 07.12.2016.
12. **Корытцын, В. А.** Качество трубопроводов в ППУ изоляции – залог их надежной и эффективной эксплуатации [Электронный ресурс] / В. А. Корытцын // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 6. – Режим доступа: <http://www.flowsystem.ru/ru/company/591>. – Дата доступа: 17.01.2017.
13. **Саати, Т.** Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. / Т. Саати, К. Керис. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.
14. **Романов, В. Н.** Основы системного анализа : учеб. пособие / В. Н. Романов. – СПб : СЗГЗТУ, 1996. – 206 с.
15. **Романов, В. Н.** Системный анализ для инженеров / В. Н. Романов. – СПб : СЗГЗТУ, 2006. – 186 с.

Статья сдана в редакцию 2 марта 2017 года

Ирина Анатольевна Леонович, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: loleonina@gmail.com.

Антон Александрович Александриков, инженер-проектировщик, ООО «СМИТ-Ярцево».
E-mail: galeon@yandex.ru.

Владимир Вячеславович Титов, студент, Белорусско-Российский университет.

Irina Anatolyevna Leonovich, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: loleonina@gmail.com.

Anton Aleksandrovich Aleksandrikov, design engineer, «SMIT-Yartsevo» Group. E-mail: galeon@yandex.ru.

Vladimir Vyacheslavovich Titov, student, Belarusian-Russian University.