

КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НЕПРОЕКТНЫХ РЕЖИМАХ

Гашо Е.Г., Киселева А.И., Романов Г.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

290461@bk.ru, sashulka_kiseleva@mail.ru, g_romanov@mail.ru

Аннотация: Предложен комплексный показатель качества, позволяющий спрогнозировать состояние системы и предельный срок ее эксплуатации. Разработанный показатель может быть применен для любых тепловых сетей: как для паровых, так и для водяных. На основании полученного показателя можно разрабатывать рекомендации для улучшения качества теплоснабжения.

Ключевые слова: квалиметрия, промышленные теплоэнергетические системы, качество продукции, системы пароснабжения, непроектные режимы.

Введение

Качество продукции, системы – понятие многогранное. В первую очередь качество продукции ассоциируется с комплексом ее естественных свойств, которые определяют ее полезность. Продукцией топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является топливо, электрическая и тепловая энергия. Несмотря на видимое различие энергетической продукции, вся она имеет общее полезное свойство – способность совершать работу (или превращаться в другие виды энергии) [1]. Качество тепловой энергии, в зависимости от теплоносителя может характеризоваться такими

параметрами как температура, давление, энтальпия и другими. Таким образом, понятие качества идентично для всех видов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), в то время как параметры, определяющие качество, будут различны для каждого вида ресурса.

Проблема качества теплоснабжения в научно-практическом плане представляется как система взаимосвязанных вопросов, решение которых направлено на разработку и совершенствование показателей и нормативов качества энергоснабжения.

Разработка методик оценки качества теплоснабжения началась с появления первых систем централизованного теплоснабжения. Одним из первых упоминаний об определении показателей качества теплоснабжения следует считать публикацию Л.К. Якимова, где была сформулирована задача определения предельного радиуса теплофикации [2]. В тексте работы, в рамках главы «Технико-экономический расчет тепловых сетей» представлен аналитический способ определения оптимального радиуса действия тепловых сетей. Однако этот метод позволяет гарантировать эффективность теплоснабжения лишь на этапе проектирования. Прорывом в направлении исследования качества теплоснабжения явился период 1951-1957 гг., когда Е.П. Шубиным [3] был подробно рассмотрен принципиально новый показатель – оборот тепловой энергии. Каждое значение данного показателя по всей СЦТ различно и зависит от величины расчетной тепловой нагрузки потребителя и расстояния от теплоисточника до точки подключения тепловой нагрузки. Впоследствии отношение оборота тепловой нагрузки к суммарной тепловой нагрузке было переименовано в средний радиус теплоснабжения. Научным способом было доказано, что эффективность централизованного теплоснабжения не может оцениваться в целом по СЦТ, эффективность СЦТ носит территориальный характер и в зависимости от комплекса факторов может принимать различные значения.

Зачастую понятие «качества» отождествляется с температурой теплоносителя подающего трубопровода теплосети. Хотя качество температурного режима помещения обеспечивается не температурой теплоносителя подающего трубопровода, а количеством поставляемого тепла и рациональным использованием этого тепла внутри помещения, а также перерывами в предоставлении теплоносителя. Однако этот метод не является точным, так как при оценке качества со стороны только термодинамических параметров не контролируется главное требование к системе теплоснабжения – надежность и бесперебойность теплоснабжения.

Вопрос надежности тепловых сетей исследовали А.И. Юфа, Н.В. Калинин, А.А. Ионин, Е.В. Сеннова и др [4,5,6]. Под надежностью тепловых сетей понимается их способность обеспечивать потребителей требуемым количеством теплоносителя при заданном его качестве, оставаясь в течение заданного срока (25 – 30 лет) в полностью работоспособном состоянии при сохранении заданных на стадии проектирования технико-экономических показателей (значений абсолютных и удельных потерь теплоты, удельной пропускной способности, расхода электроэнергии на перекачку). Методики расчета, определяющие показатели надежности, не затрагивают термодинамические, эксплуатационные, экологические и технические характеристики.

Однако применение перечисленных методик на практике дает не полную картину о качестве теплоснабжения, так как они включают в себя лишь отдельные единичные показатели, а не учитывают их взаимосвязь и чувствительность друг к другу. Отсутствие методик для полной оценки качества теплоснабжения обуславливает актуальность расширения методической базы по оценке качества систем теплоснабжения с целью практического применения при проектировании и модернизации систем теплоснабжения городов [7].

Основными задачами системы менеджмента качества являются планирование, разработка и производство продукции и услуг в соответствии с требованиями и ожиданиями потребителя. Международные стандарты системы менеджмента качества серии ISO 9000 определяют качество как «степень соответствия продукции требованиям». Современный менеджмент признает, что самый верный способ достичь качества – руководствоваться запросами и ожиданиями потребителей продукции уже на самых ранних стадиях жизненного цикла – при проектировании и разработке (модернизации) продукции. На сегодняшний день самым мощным инструментом прямого воплощения требований потребителя в непосредственные характеристики новой (или модернизируемой) продукции является методология развертывания функции качества QFD. Метод QFD дает средства преобразования общих требований потребителя в установленные характеристики конечной продукции и управления процессом. Таким образом, QFD является средством обеспечения взаимодействия между потребителем и службами организации, действующими на различных этапах жизненного цикла продукции: «Изучение рынка», «Проектирование», «Закупки», «Производство». QFD является гибким методом принятия решений

и помогает организации сосредоточить внимание на важнейших характеристиках новой или существующей продукции или услуг с точки зрения отдельного клиента, сегмента рынка, компании, или технологии развития. Результатами применения методики являются понятные схемы и матрицы, которые могут быть повторно использованы для будущих товаров либо услуг. Развертывание функции качества QFD осуществляется с использованием матричной диаграммы (рисунок 1), названной в соответствии со своей формой «Дом качества».

Однако этот метод и другие методы менеджмента качества являются эффективными только на стадии планирования и проектирования продукции и редко используются для теплоэнергетических систем. В связи с этой особенностью была принята попытка модернизация метода структурирования функции качества (QFD) с целью оценки эксплуатации уже существующих объектов промышленной теплоэнергетики. За основу было взято графическое отображение функции качества с некоторыми дополнениями и нововведениями.

В качестве объекта исследования были выбраны паропроводы промышленного назначения, актуальность исследования которых обусловлена следующими причинами:

- непроектные режимы эксплуатации;
- неудовлетворительное техническое состояние и обслуживание сетей;
- нарушение тепловой изоляции;
- длительный срок эксплуатации трубопроводов (замены требует каждый пятый километр теплотрассы на территории РФ);
- недостаточный контроль регулирующих органов за процессом транспортировки тепловой энергии.

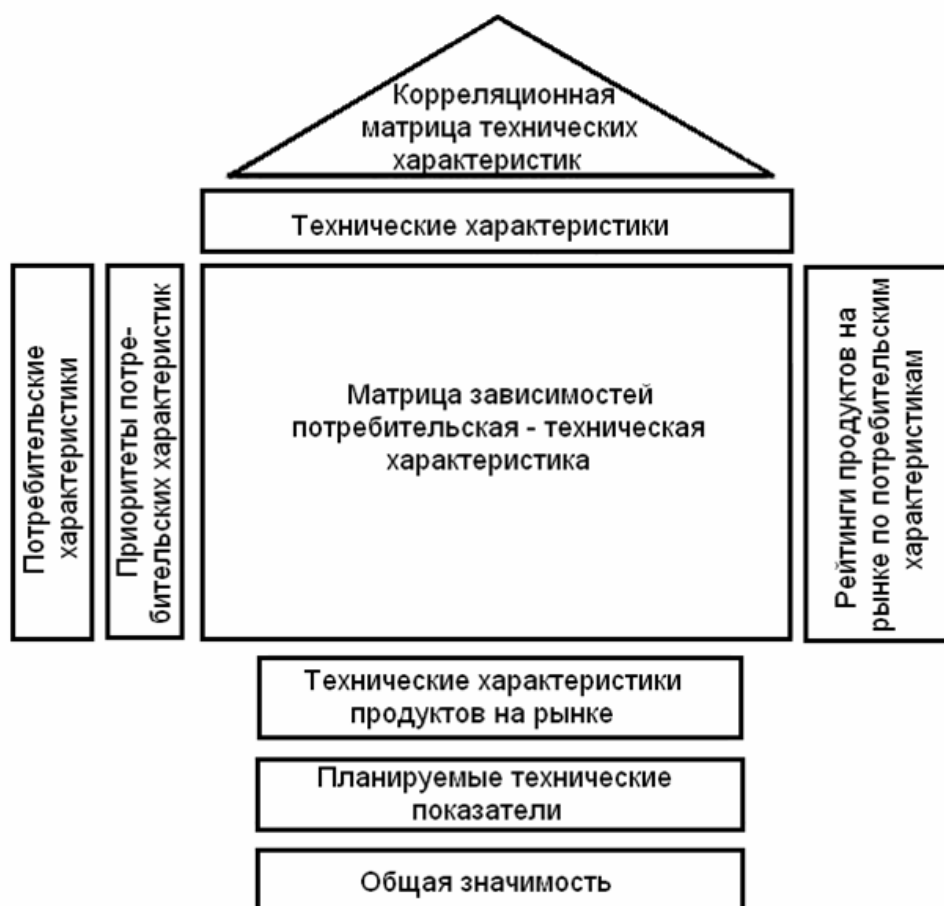


Рис.1. Метод структурирования функции качества в виде «дома качества»

Перед владельцами таких паропроводов вопрос оценки качества и возможности дальнейшей эксплуатации стоит особенно остро в связи со следующим: нерасчетные режимы эксплуатации приводят к образованию конденсата в паропроводах, недоучету тепловой энергии и теплоносителю, нарушению режима основного оборудования на источнике тепла. При попытке вывода из

эксплуатации таких промышленных паропроводов генерирующие компании сталкиваются с серьезными трудностями как нежелание потребителей переходить на индивидуальные (альтернативные) источники тепловой энергии, что в свою очередь замедляет процесс вывода паровых сетей из работы со стороны городской администрации и других руководящих органов.

В качестве объекта исследования была взята система пароснабжения г. Смоленска, схема которой представлена на рисунке 2. Первоначально паропровод №5 от ТЭЦ-2 был спроектирована на комплекс промышленных потребителей, суммарная нагрузка составляла 90 т/ч. Однако в начале 90-х гг резко сократилось число промышленных предприятий, использующих пар в качестве теплоносителя.

На 2019 год нагрузка составляет:

- в отопительный период: 16,012 Гкал/ч, 24,168 т/ч;
- в межотопительный период: 12,855 Гкал/ч, 19,429 т/ч.

В состав станции входит три турбоагрегата: ПТ-60-130/13, Т-100/120-130-2 и Т-110/120-130-4. Котельное оборудование станции включает паровые котлы БКЗ-210-140 (4 шт.) и ТГМЕ-464, три водогрейных котла КВГМ-100.

В связи с критически низким отбором пара на промышленность, на данный момент турбина ПТ-60-130/13 отключена. Отпуск тепла оставшимся промышленным потребителям осуществляется от редуционно-охладительных устройств РОУ-140/15, куда направляется перегретый пар непосредственно от паровых котлов станции. Такой способ подачи пара потребителям является экономически невыгодным и приближает режим работы ТЭЦ к режиму котельной. Подключенные на данный момент потребители, в основном используют пар для пропарки железобетонных и других изделий.

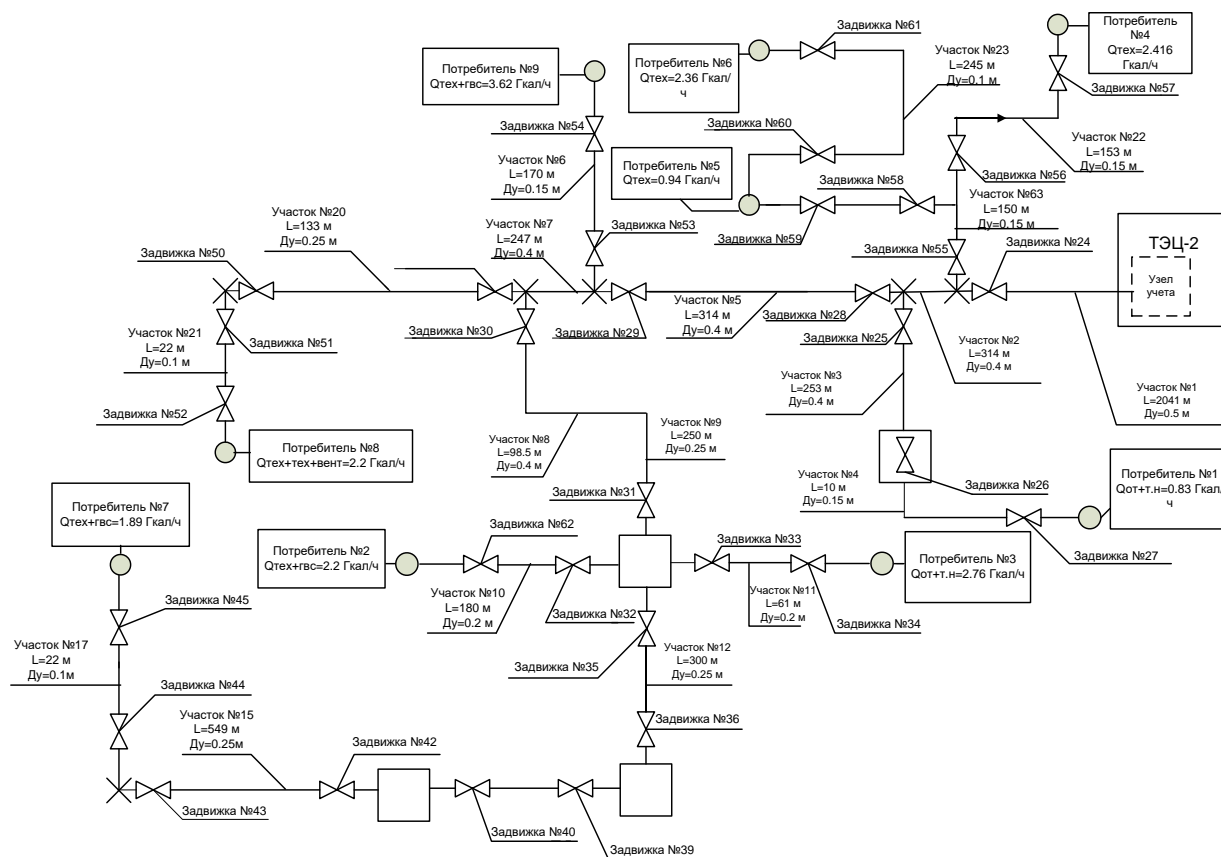


Рис. 2. Система пароснабжения г. Смоленска

По данным узла учета, предоставленного источником, была построена гистограмма, позволяющая оценить величину потерь тепловой энергии при эксплуатации паропровода в непроектном режиме, представленная на рисунке 3.

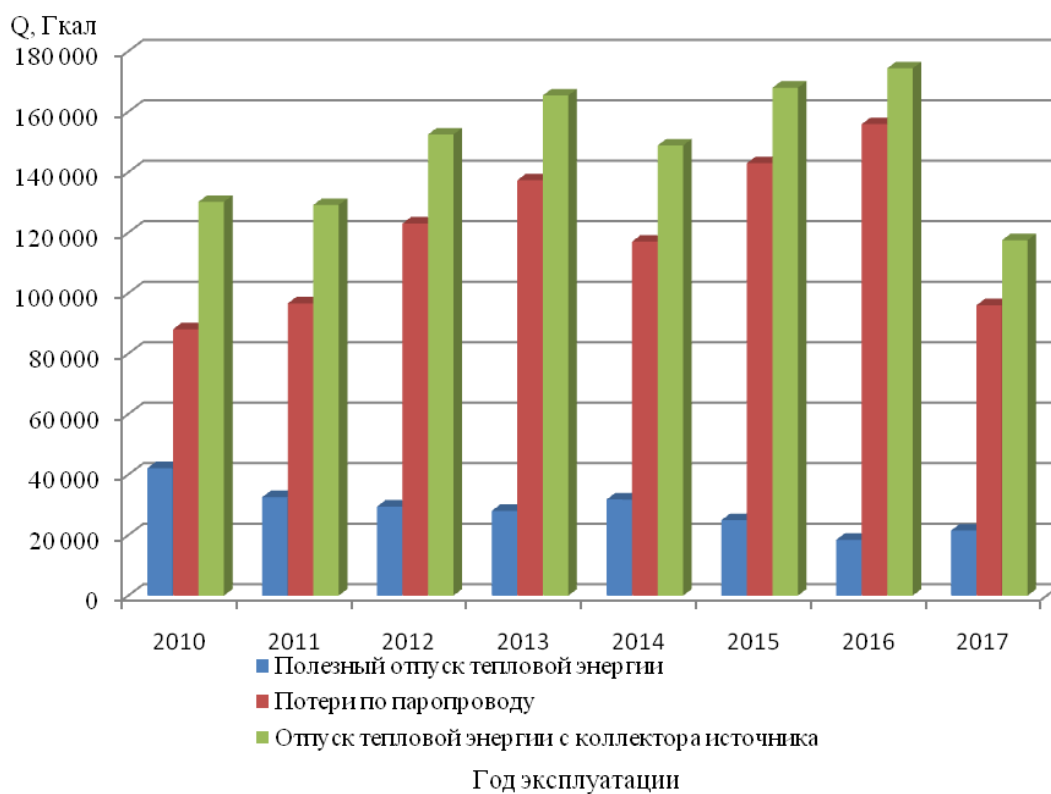


Рис. 3. Полезный отпуск и тепловые потери по паропроводу №5

Как видно из полученных зависимостей, возникает проблема небалансов расхода пара между энергоснабжающей организацией и потребителями. Даже при росте отпуска тепловой энергии, тепловые потери пропорционально растут. Кроме того, не все потребители готовы оплачивать безвозвратные потери, сопровождающие транспортировку влажного пара, если это не было предусмотрено исходными договорами.

В процессе эксплуатации систем пароснабжения часть переданного тепла от источника теряется через теплоизоляцию трубопроводов. Тепловые потери через теплоизоляцию паропровода при разной нагрузке должны иметь постоянные абсолютные значения и разные относительные. Состояние тепловой сети удовлетворительное, износ тепловой изоляции не более 50%. и основные затраты на ремонт трубопровода идут на замену изоляции и ЗРА.

Несмотря на увеличение с каждым годом капитальных затрат на ремонт паропровода потери тепловой энергии имеют постоянное относительное значение и составляют около 80% от отпускаемого тепла.

Все вышеперечисленные факторы и особенности работы в нерасчетных режимах обосновывают актуальность разработки комплексного критерия позволяющего оценить качество транспорта тепловой энергии (в нашем случае – в виде пара) и возможность дальнейшей эксплуатации таких объектов технической стороны.

При разработке комплексного критерия оценки качества тепловых сетей были решены следующие задачи:

- определение номенклатуры показателей качества для тепловых сетей;
- расчет показателей качества с целью оценки качества теплоснабжения;
- определение эталона «тепловой сети» для рассматриваемого объекта;
- определение комплексного показателя качества тепловых сетей.

Первым этапом при определении номенклатуры показателей качества для любого промышленного объекта является установление класса и группы продукции [8]. Промышленные паропроводы можно отнести к продукции, расходующей свой ресурс и группе ремонтируемых изделий. Согласно нормативной документации, для этого типа продукции необходимо определять все единичные и комплексные показатели качества.

При проведении анализа технической литературы, который представлял собой подсчет количества упоминаний по каждой группе показателей качества, было выявлено, что определение

абсолютно всех показателей для объекта исследования излишне. Распределение весомостей показателей качества для тепловых сетей представлено на рис 4.

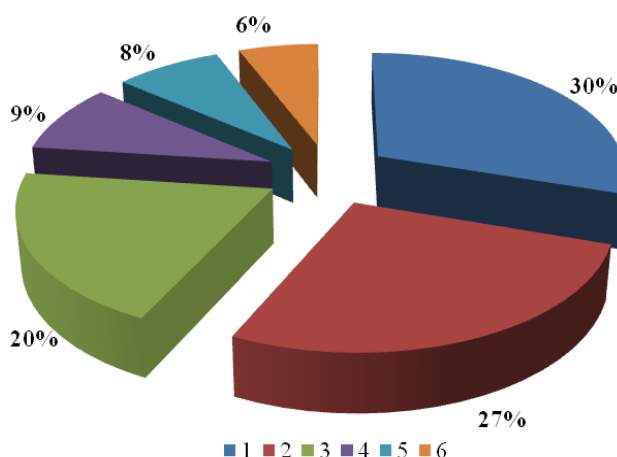


Рис.4. Распределение весомостей показателей качества для тепловых сетей. 1 – показатели надежности, 2 – показатели назначения, 3 – экологические показатели, 4 – показатели технологичности, 5 – показатели экономного использования сырья, материалов и топлива, 6 – прочие показатели

Главным требованием при оценке качества любой продукции является наличие базового образца (эталона). Базовый образец должен относиться к оцениваемой продукции или аналогичной по назначению и условиям эксплуатации продукции. Особенностью данного паропровода является работа в нерасчетном режиме. На данный момент загрузка составляет $\approx 30\%$ от расчетной, поэтому в качестве эталона был спроектирован паропровод на ту же нагрузку, что и оцениваемый объект, но с учетом экономической скорости движения пара.

Для данного паропровода были рассчитаны те же показатели качества, что и для рассматриваемого объекта, а именно: показатели назначения (производительность, средняя температура, средний диаметр трубопровода, максимальная скорость теплоносителя и т.д.), показатели надежности (вероятность безотказной работы, коэффициент готовности к обеспечению расчетного теплоснабжения, среднее время до восстановления участков тепловой сети, годовой недоотпуск тепла), экологические показатели (доля тепловых потерь из-за нерасчетных температур, нормативные годовые потери теплоты через теплоизоляцию, нормативные годовые потери теплоносителя, фактические потери тепла и т.д.), показатели технологичности (материальная характеристика сети, рабочая вместимость паропровода, объем теплоизоляции, масса конструкции, занимаемая площадь, площадь поверхности теплообмена) и показатели экономного использования сырья, материалов и топлива (производительность на единицу занимаемой площади, удельная материальная характеристика сети, удельная длина тепловой сети, коэффициент полезного действия, расход тепловой изоляции на единицу продукции и т.д.). Расчеты проводились по основным термодинамическим зависимостям и представлены в таблице 1.

Для определения качества тепловой сети был применен формальный подход, который осуществляется с использованием матричной диаграммы, названной в соответствии со своей формой «домом качества». Путем деления абсолютных значений единичных показателей исследуемого объекта на абсолютные значения базового образца были получены относительные значения показателей качества. В результате был определен комплексный показатель, представленный пунктирной линией на «крыше качества» (рис. 5).

Группы показателей качества отображаются наклонными прямыми. Длина каждой прямой, характеризующей группу показателей, была определена весомостью при проведении литературного анализа (например, показатели надежности являются важнейшими показателями, поэтому линия, характеризующая эту группа самая длинная). На горизонтальной прямой расположены нулевые значения показателей.

После нанесения относительных показателей качества, по методу наименьших квадратов была построена аппроксимирующая линия, являющаяся комплексным показателем качества паропровода, в общем.

Уровень предельного теплоснабжения характеризует такое состояние системы, когда показатели качества превышают «эталонные» значения, регламентируемые нормативной документацией.

На рисунке также представлена связь между инженерными характеристиками тепловых сетей и потребительскими требованиями, где 3 – сильная связь, 2 – слабая связь, 1 – связи нет. Такое наглядное представление оценки качества теплоснабжения, позволяет найти причину снижения эффективности теплоснабжения и предупредить возможные последствия нарушения теплоснабжения.

Показатели надежности обеспечивают 47,4% от должного качества (эталонного, соответствующего значению 100%). Наибольшее влияние на эту группу показателей оказывает вероятность безотказного теплоснабжения, которая в большей степени не отвечает нормативному значению $P_j=0.9$ [9]. Для того чтобы исправить эту ситуацию, теплоснабжающей организации можно порекомендовать уделить внимание техническому обслуживанию данного паропровода и проводить ежегодные ремонтно-профилактические работы.

Экологические показатели находятся на самой низкой отметке (28,8%), что объясняется тем, что показатели потерь тепла и теплоносителя значительно превышают допустимые значения. Во избежание подобных ситуаций следует уделить большое внимание состоянию тепловой изоляции паропровода и вопросам энергосбережения в целом.

Показатели технологичности и показатели экономного использования сырья, материалов и топлива не соответствуют должному значению по причине недогрузке паропровода, что позволяет сказать о нерациональном использовании материалов и сырья.

Таблица 1 – Расчет единичных показателей качества для системы пароснабжения (на 2017 г.)

Показатели назначения			
№ п/п	Показатель	Значение	Эталон
1	Производительность, т/ч	34,31	34,31
2	Средняя температура, °С	161,92	174,83
3	Средний диаметр трубопровода, м	0,230	0,087
4	Средняя толщина теплоизоляции, м	0,193	0,145
5	Максимальная скорость теплоносителя, м/с	10,6	70
5	Годовой недоотпуск тепла из-за несоответствия фактических температур договорным, ГДж	5184,43	0
Показатели надежности			
№ п/п	Показатель	Значение	Эталон
1	Вероятность безотказной работы	0,0005	0,9
2	Коэффициент готовности к обеспечению расчетного теплоснабжения	0,969	0,97
3	Среднее время до восстановления участков ТС, ч	24,53	22
4	Годовой недоотпуск тепла потребителям из-за несоответствия значения вероятности безотказной работы нормативному, Гкал	4528,5	0
Экологические показатели			
№ п/п	Показатель	Значение	Эталон
1	Доля тепловых потерь из-за нерасчетных температур	0,25	0
2	Нормативные годовые потери теплоты через теплоизоляцию, Гкал	5943	3545
3	Нормативные годовые потери теплоносителя, т	230,02	33,4
4	Фактические потери тепла, Гкал	6516,5	6412,75
5	Годовой недоотпуск тепла потребителям из-за несоответствия значения вероятности безотказной работы нормативному, Гкал	4528,5	0

Показатели назначения			
№ п/п	Показатель	Значение	Эталон
6	Годовой недоотпуск тепла из-за несоответствия фактических температур договорным, ГДж	5184,43	0
Показатели технологичности			
№ п/п	Показатель	Значение	Эталон
1	Материальная характеристика сети, м ²	2062,35	798,04
2	Рабочая вместимость паропровода, м ³	643,3	99
3	Объем теплоизоляции, м ³	2689,22	889,28
4	Масса конструкции вес, т	410,3	103,8
5	Занимаемая площадь, м ²	71963,16	54757,46
6	Площадь поверхности теплообмена, м ²	6915,6	2739,5
Показатели экономного использования сырья, материалов и топлива			
№ п/п	Показатель	Значение	Эталон
1	Производительность на единицу занимаемой площади, (т/ч)/м ²	0,033	0,005
2	Удельная материальная характеристика, м ² /Гкал/ч	94,52	36,57
3	Удельная длина тепловой сети, м/Гкал/ч	288,9	288,9
4	Коэффициент полезного действия	90,08135	100
5	Расход тепловой изоляции на единицу продукции, м ³ /(Гкал/ч)	123,35	40,79
6	Переплата из-за превышения типоразмеров трубопровода, %	390	0

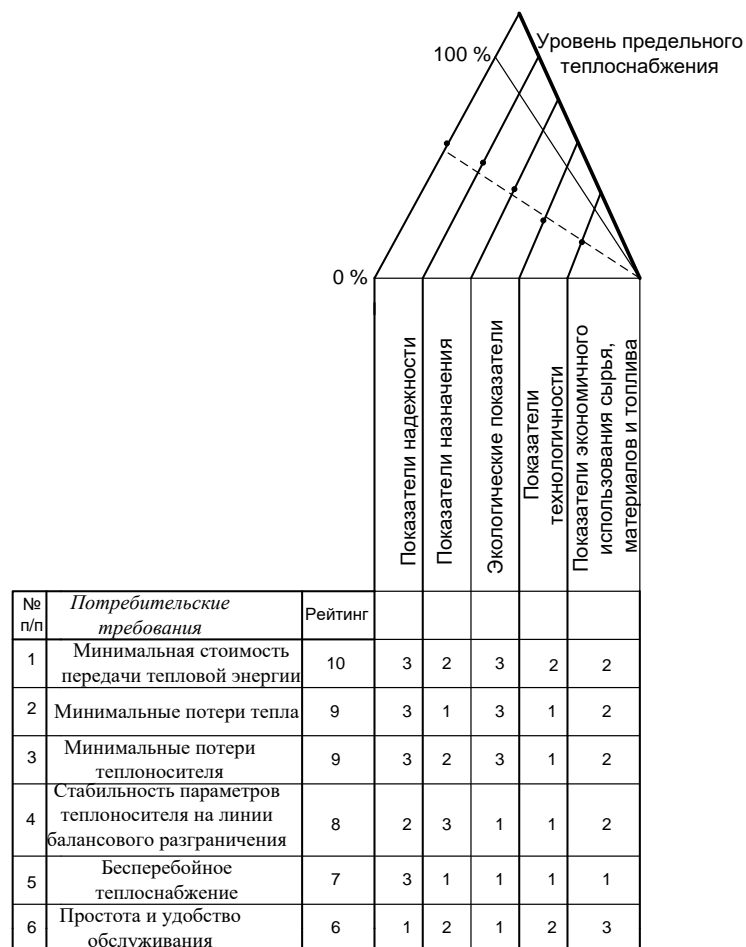


Рис. 5. «Дом качества» для тепловых сетей

В результате построения комплексного показателя выявлены основные причины некачественного теплоснабжения для паровых сетей и их последствия. Определена номенклатура показателей качества для тепловых сетей, произведен расчет показателей. На основании полученных результатов выведен комплексный показатель качества, учитывающий параметры тепловых сетей и их влияния на качество теплоснабжения в целом [10].

Следующим этапом, позволяющим оценить качество транспорта тепловой энергии в нерасчетном режиме, являлось нанесение срока эксплуатации паропровода.

С целью определения дальнейшей возможности эксплуатации паропровода №5 в непроектном режиме, были рассчитаны комплексные показатели качества на 2019-2020 гг. по существующей тенденции паропотребления. Предельно допустимый уровень качества тепловых сетей соответствует такому состоянию паропровода, при котором нарушены требования нормативной документации и паропровод перестает выполнять свою функцию – передачу качественного пара потребителям.

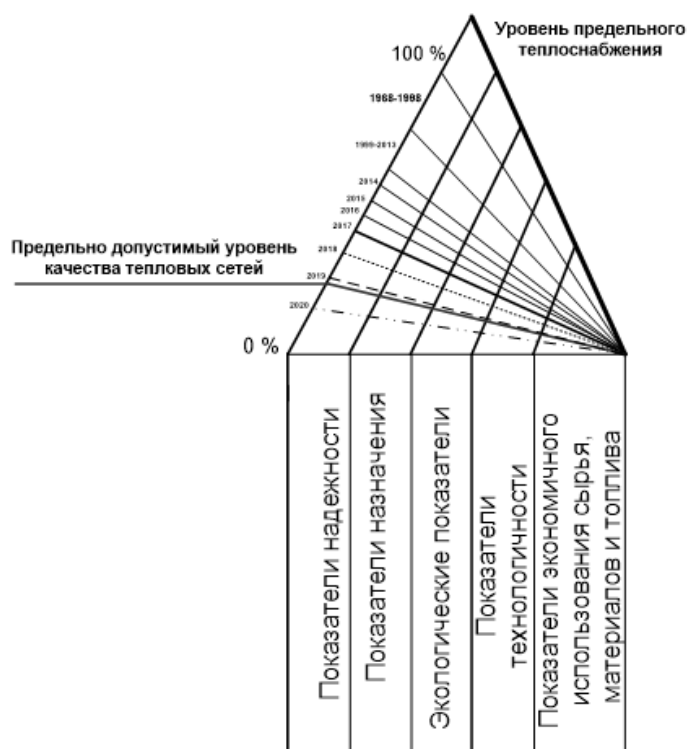


Рис. 6. «Дом качества» для тепловых сетей с годами эксплуатации

Главным плюсом разработанной методики оценки качества тепловых сетей является возможность прогнозирования предельного срока эксплуатации.

Представленные результаты позволяют сказать, что на сегодняшний день нагрузка на паропровод №5, составляющая менее 30% от проектной, является критической. При сложившейся тенденции снижения промышленного паропотребления, предельным сроком эксплуатации исследуемого объекта является первая половина 2019 года, после чего за счет влияния комплекса показателей, паропровод на балансе филиала ПАО «Квадра» – «Смоленская генерация» будет технически непригоден для эксплуатации в непроектном режиме.

Для оценки достоверности применения данного метода был произведен расчет остаточной толщины стенки на фактический и прогнозируемые периоды. Результаты расчета для магистрального участка представлены на рисунке 7 и дают схожий по выводу паропровода из эксплуатации результат (конец 2018 – начало 2019 г.).

Также достоверность применения комплексного показателя качества подтверждается аварией на магистральном участке паропровода, зафиксированная 10 января 2019 г. и приказ ТСК «О выводе из эксплуатации №5» о закрытии паропровода от 30.04.2019 г.

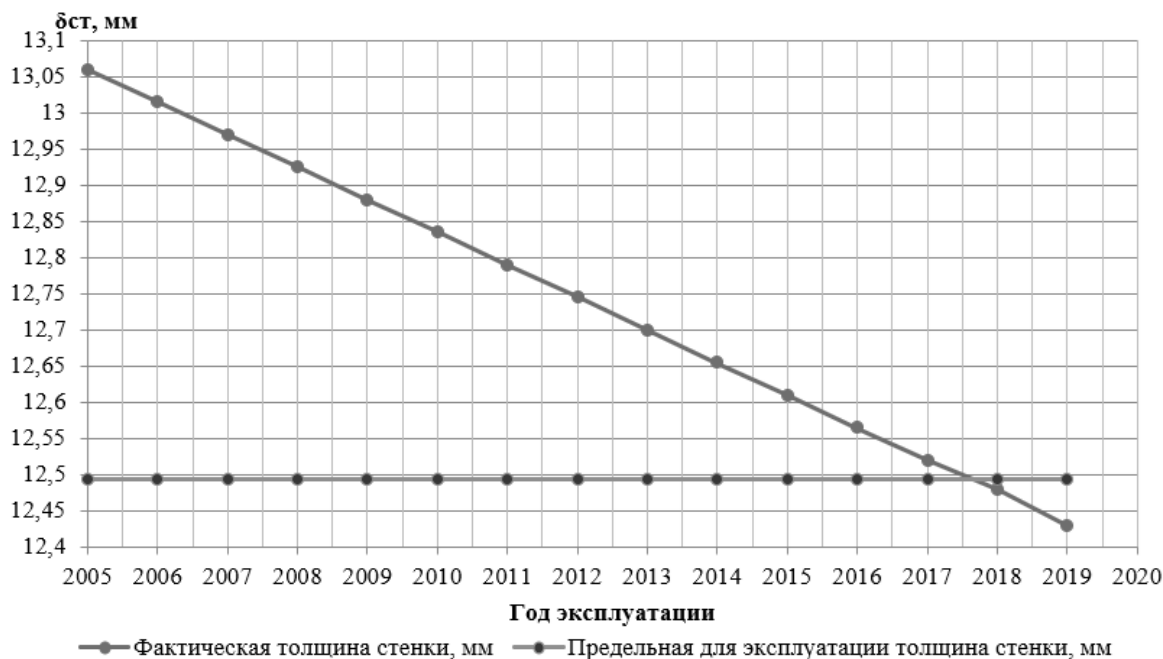


Рис. 7. Определение остаточной толщины стенки магистрального паропровода

Данный метод оценки качества требует дальнейших исследований, так как присутствует погрешность при графическом построении комплексного показателя качества и прогнозировании единичных показателей на периоды вперед. Несмотря на малое количество исследуемых объектов, разработанная методика определения качества транспорта тепловой энергии может быть применена для любых тепловых сетей: как для паровых, так и для водяных; ее можно рекомендовать как при проектировании тепловых сетей, так и для определения качества уже давно эксплуатируемых объектов.

На основании полученного комплексного показателя можно разрабатывать рекомендации для улучшения качества систем теплоснабжения, давать оценку уровню эффективности транспорта тепловой энергии и прогнозировать предельный срок эксплуатации тепловых сетей при нерасчетных режимах.

Литература

1. Кузнецов Е.П. Качество теплоснабжения городов: учебное пособие / Е.П. Кузнецов, Н.В. Кобышева, Т.А. Дацюк и др. – 2-е изд.– СПб.: ПЭИПК, 2004. – 294 с.
2. Якимов Л. К. Предельный радиус действия теплофикации / Л.К. Якимов // Тепло и сила. - 1931. - № 9. С. 8–10.
3. Шубин, Е.П. Проектирование городских тепловых сетей / Е.П. Шубин. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
4. Калинин Н. В., Никифоров А. Г., Юхимчук А. А., Яковлев, А. В. Повышение надежности систем теплоснабжения за счет рационализации построения схемных решений // Надежность и безопасность энергетики. 2008. № 1. С. 42-46 .
5. Ионин А. А. Надежность систем тепловых сетей, Москва: Стройиздат, 1989.
6. Сеннова Е. В., Ощепкова Т. Б., Мирошниченко В. В. Методические и практические вопросы построения надёжных теплоснабжающих систем // Известия академии наук. Энергетика. 1999. №4. С.65-75.
7. Архангельская Е.Л., Елизарова Н.Н. Информационное обеспечение управления качеством теплообеспечения потребителей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2012. № 4. С. 66-71.
8. Федюкин В.К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции – М.: Кнорус, 2015. – 287 с.
9. СП 124.13330.2012 «Тепловые сети» – 78 с.
10. Киселева А.И., Фокин А.М. Влияние отдельных показателей на качество функционирования паропроводов. Материалы докладов I Поволжской научно-практической конференции / под

общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2015.– 640 с.