

DOI: 10.17516/1999-494X-0339

УДК 697.34

Pressure Testing the District Heating Systems: Results of Retrospective Analysis

Stanislav V. Chicherin^{*a}, Andrei V. Zhuikov^b,
Anatoly I. Matiushenko^b and Vladimir A. Kulagin^b

^a*Omsk State Transport University
Omsk, Russian Federation*

^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 21.07.2021, received in revised form 14.08.2021, accepted 21.09.2021

Abstract. Distribution of thermal energy using different types of mains has experienced practical application and much development over a period of more than a century. Technical excellence, operational characteristics including conservation of heat energy, reliability and future maintenance are of prime consideration. Reliability of heat supply is evaluated by the number of network failures. Failure amount in district heating (DH) networks is enormous. It makes us pay attention to DH performance issues. It is sufficiency to rehabilitate only mostly outworn distribution lengths to reduce a failure rate and heat losses. The main mean is hydraulic pressure tests. The aim of the paper is data generalization and provision an overview of the subjects included in the project within certain DH system (e. g. Omsk's DH system). The article includes general information about this method. The process to prepare this paper was as follows: defining the scope of works for the study which was discussed and mutually agreed in meetings between the authors. Back-in-time pressure tests operation data analysis technique is chosen to receive a valid data. Then the study was started with collecting relevant data in written form, a background study, familiarizing to previous studies and reports made during the span of years. Its efficiency was analysed. Negative causes were given. Relevance of modernization of pressure tests performance was clarified during the state assessment as well as the development of the same option in the future. According to the collected data the authors carried out that future research in this field is required.

Keywords: district heating, distribution, pipeline, pressure test, reliability, dependability.

Citation: Chicherin S. V., Zhuikov A. V., Matiushenko A. I., Kulagin V. A. Pressure testing the district heating systems: results of retrospective analysis, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(6), 623–640. DOI: 10.17516/1999–494X-0339

Результаты применения ретроспективного анализа для гидравлических испытаний систем централизованного теплоснабжения

С. В. Чичерин^{*а}, А. В. Жуйков^б,
А. И. Матюшенко^б, В. А. Кулагин^б

^аОмский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Омск

^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Распределение тепловой энергии с использованием различных типов магистралей имеет широкое применение и получило значительное развитие за последнее столетие. Важность их технического состояния и эксплуатационных характеристик, таких как сохранение тепловой энергии, надежность и срок службы, не вызывает сомнений. Количество повреждений на тепловых сетях чрезмерно велико. Это делает актуальными вопросы надежности теплоснабжения. Для снижения аварийности и необоснованных теплопотерь достаточно заменить только самые изношенные участки тепловых сетей. Основным методом их определения – гидравлические испытания на плотность и прочность (опрессовки). Целью данной работы стала систематизация имеющейся информации по гидравлическим испытаниям в рамках определенной системы теплоснабжения (на примере г. Омска). Дана общая информация об этом методе. Водно-химический режим тепловых сетей должен обеспечить их эксплуатацию без повреждений и снижения экономичности, вызванных коррозией сетевого оборудования, а также образованием отложений и шлама в оборудовании и трубопроводах тепловых сетей. Исходной причиной появления коррозии углеродистой стали в природных водах и при умеренных параметрах служит растворенный в ней кислород. Известно, что чистая поверхность железа очень быстро вступает в реакцию с растворенным кислородом, и скорость всего процесса определяется (лимитируется) возможностями его доставки. Заметно значительное повышение содержания кислорода в летний период, неизменно связанный с проведением гидравлических испытаний на плотность и прочность. В отдельные дни отмечаются критически высокие уровни, превышающие 50 мг/дм³. Необходимо изменение существующего порядка заполнения и запуска системы, в частности заполнение системы только деаэрированной водой. Для получения достоверных сведений был выбран метод ретроспективного анализа данных о результатах проведения гидравлических испытаний на магистральных трубопроводах г. Омска по материалам соответствующих актов. Численно проанализирована их эффективность. Приведены отрицательные последствия проведения опрессовок. Рассмотрение сложившейся ситуации указало на целесообразность совершенствования практики их проведения, а в перспективе и возможности разработки единого подхода к этому вопросу. На основании обобщения указанного материала сделаны выводы о положительном опыте создания программного обеспечения на базе геоинформационных систем.

Ключевые слова: теплоснабжение, тепловые сети, трубопровод, гидравлическое испытание, опрессовка, надежность, безотказность, внутренняя коррозия, кислород.

Цитирование: Чичерин, С. В. Результаты применения ретроспективного анализа для гидравлических испытаний систем централизованного теплоснабжения / С. В. Чичерин, А. В. Жуйков, А. И. Матюшенко, В. А. Кулагин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(6). С. 623–640. DOI: 10.17516/1999–494X-0339

Введение

Тепловые сети испытывают на герметичность (плотность) после окончания строительства перед вводом их в эксплуатацию, а затем ежегодно после окончания отопительного периода для выявления дефектов, подлежащих устранению при капитальном ремонте и после окончания ремонта, перед включением сетей в эксплуатацию.

Такая практика сохранилась лишь в России и в некоторых странах, бывших республиках Советского Союза, ныне странах СНГ, Прибалтики и Восточной Европы. В развитых странах континентальной Европы, Скандинавии, Великобритании и США от такого рода испытаний давно отказались [1].

Повреждения, вызванные внутренней коррозией, обычно имеют вид небольших сквозных отверстий, когда дно коррозионной лунки достигает внешней поверхности трубы или щели в сварочном шве. Протечки через такие повреждения невелики, и их трудно обнаружить. Обычно они своевременно не устраняются. Сетевая вода, выходя под давлением из сквозного отверстия, увлажняет и разрушает гидро- и теплоизоляцию. Для своевременной локализации повреждений, вызванных внутренней коррозией, Хонг и др. [2] предлагают метод оценки, базирующийся на понимании механики развития коррозионной лунки и знании электрохимического процесса. Если их не устранить, на наружной поверхности трубы создаются благоприятные условия для интенсивного развития наружной коррозии. В отличие от внутренней коррозии наружная коррозия реализуется как сплошное утонение металла на большой площади. Когда толщина стенки трубы уменьшается до критической величины, она разрушается, образуя интенсивную протечку теплоносителя [3].

Водно-химический режим тепловых сетей должен обеспечить их эксплуатацию без повреждений и снижения экономичности, вызванных коррозией сетевого оборудования, а также образованием отложений и шлама в оборудовании и трубопроводах тепловых сетей [4].

Исходной причиной появления коррозии углеродистой стали в природных водах и при умеренных параметрах служит растворенный в ней кислород. Известно, что чистая поверхность железа очень быстро вступает в реакцию с растворенным кислородом и скорость всего процесса определяется (лимитируется) возможностями его доставки. Сю и др. [1] описывают методы, связанные с применением машинного обучения; они позволяют удаленно определять наиболее аварийно-опасные участки, анализируя лишь информацию о содержании кислорода и владея статистическими данными по его распределению по лучам (участкам) тепловых сетей. Другие коррозионно-значимые факторы опосредуют действие кислорода через их влияние на свойства слоев продуктов коррозии, которые образуются на поверхности стали. Если образуются слои, которые эффективно препятствуют проникновению через них кислорода, стальные конструкции могут длительное время сохранять полезные свойства. В противном случае сталь будет быстро разрушаться [4].

Исследование процессов коррозии углеродистых сталей трубопроводов тепловых сетей [5] показало, что даже кратковременное увеличение концентрации («проскока») кислорода в воде при температуре 20–70 °С приводит к образованию на поверхности металла долго живущих питтингов, которые, однажды образованные, продолжают развиваться и в деаэрированной воде, превращаясь в язвы и свищи, и увеличивают повреждаемость трубопроводов от внутренней коррозии [6].

Содержание растворенного кислорода не должно быть более 20 мкг/дм³ и учитываться современными программными комплексами [7]. В начале отопительного сезона и в послеремонтный период допускается превышение норм растворенного кислорода в течение 4 недель для закрытых систем теплоснабжения – до 30 мкг/дм³ [8]. Для небольших тепловых источников, где нет возможности организовать качественную водоподготовку, фактические показатели могут превышать нормативные в 2–3 раза [8–10].

Материалы и методы исследования

Как при проведении гидравлических испытаний, так и в режиме нормальной эксплуатации распределение напоров в каждой точке сети описывается гидравлическими зависимостями:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{л}} + \Delta P_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{л}}$ – линейное падение давления теплоносителя, м;

$$\Delta P_{\text{л}} = R \cdot l, \quad (2)$$

R – удельное линейное падение давления на единицу длины трубопровода, Па/м;

l – длина участка трубопровода неизменяемого диаметра, м.

При расчете R , как правило, подставляется согласно уравнению Д'Арсия:

$$R = \lambda \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \frac{\rho}{d}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент трения;

d – гидравлический диаметр трубопровода, м;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

w – скорость движения горячей воды, м/с.

Скорость теплоносителя через сечение трубопровода выражается следующей зависимостью м/с:

$$w = \frac{G}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}, \quad (4)$$

Объединяя уравнения (3) и (4), получаем:

$$R = 0,8125 \cdot \lambda \cdot \frac{G^2}{d^5 \cdot \rho}. \quad (5)$$

Для расчета коэффициента трения существует множество уравнений, наилучшую сходимость с фактическими сопротивлениями показывает следующее:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \cdot l g \cdot \frac{r}{k_s}\right)^2}, \quad (6)$$

где k_s – эквивалентная относительная шероховатость трубы.

Падение давления в запорной арматуре, тройниках, отводах, переходах ΔP_m , Па определяется по формуле

$$\Delta P_m = \sum \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho, \quad (7)$$

где $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений;

w – скорость движения теплоносителя, м/с;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

Для получения сведений необходимо статистически обработать данные журнала отбора проб воды из подающего и обратного трубопроводов каждой магистрали. Лабораторией службы испытаний и измерений теплосети производится контроль за нормами качества сетевой воды, в частности измерение содержания свободной угольной кислоты, растворенного кислорода, значения pH и других показателей. Более современные методы оперативного дистанционного контроля [11] в г. Омске не применяются. Измерения выполняются на всех радиальных магистральных тепловых сетях в соответствии с утвержденным графиком отдельно для подающего и обратного трубопроводов.

Обработка результатов измерений давления, повреждаемости и содержания растворенного кислорода производилась методами статистического анализа.

При сравнении фактической величины испытательного давления с расчетной вводилась поправка на геодезическую высоту:

$$\tilde{X}_i = X_i + \nabla_i, \quad (8)$$

где \tilde{X}_i – исправленный результат i -го наблюдения;

X_i – неисправленный результат i -го наблюдения;

∇_i – поправка на геодезическую высоту.

Средняя величина повреждаемости фиксировалась как математическое ожидание величины за каждый год:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{X}_i}{n}, \quad (9)$$

где n – количество измерений.

Для построения частотных гистограмм вычисляются величины среднеквадратических отклонений:

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{X}_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{X}_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}. \quad (11)$$

Поскольку было выполнено множество измерений, для проверки гипотезы о нормальности распределения использовался критерий Пирсона.

Ситуационное исследование было выполнено на примере г. Омска. Всего на территории г. Омска по состоянию на 01.01.2021 работают 128 организаций, имеющих в собственности или на ином законном основании 172 источника тепловой энергии, в т. ч. три ТЭЦ и 167 котельных [8], из них:

три источника с комбинированной выработкой тепла АО «ТГК-11» (ТЭЦ-3, ТЭЦ-4, ТЭЦ-5) суммарной установленной тепловой мощностью 4000,74 Гкал/ч;

ТЭЦ-2, работающая в режиме котельной, и Кировская районная котельная (КРК) АО «Омск РТС» суммарной установленной мощностью 963 Гкал/ч;

27 котельных (в т. ч. 4 технологических, 3 производственно-отопительных и 20 отопительных) МП г. Омска «Тепловая компания» суммарной установленной тепловой мощностью 556,38 Гкал/ч;

140 ведомственных котельных (в т. ч. три источника с комбинированной выработкой тепла (малая генерация), 55 производственно-отопительных и 82 отопительных) суммарной установленной тепловой мощностью около 4016 Гкал/ч, работающих на потребителей промышленности, жилого сектора, бюджетные и прочие организации.

Некоторые потребители частного сектора имеют индивидуальное теплоснабжение (печное отопление, мелкие котлы).

Схема тепловых сетей от тепловых источников Омского филиала ОАО «ТГК-11» характеризуется своей сложностью, а именно: схема радиально-кольцевая, большая протяженность тепловых сетей от источника до конечного потребителя (более 20 км), низкая резервируемость.

Эксплуатацию магистральных тепловых сетей осуществляет АО «Омск РТС». На балансе АО «Омск РТС» находится 226,4 км магистральных тепловых сетей. Проблемных сетей, которые эксплуатируются свыше 25 лет и требуют перекладки, более 80 км [12]. Имеющиеся финансовые ресурсы позволяют перекаладывать около 5 км в год.

Результаты и обсуждения

Нормативными документами предписывается проведение гидравлических испытаний в целях проверки плотности и прочности оборудования тепловых сетей перед началом отопительного периода. Их непроведение неминуемо приведет к санкциям по отношению к руководству организации, эксплуатирующей тепловые сети, со стороны федерального надзорного органа технической безопасности (Ростехнадзор).

Это определяет выбор основного метода диагностики – диагностика путем испытания сетей на гидравлическое давление. Выбор метода определяется возможностью диагностировать состояние практически всех имеющихся сетей в приемлемые сроки, его привычностью, низкой трудоемкостью, сравнительно небольшими финансовыми затратами и достаточной эффективностью [13].

Такие испытания обычно проводятся летом во время профилактического ремонта сетей и по своему характеру совершенно отличны от таких же испытаний во время первоначальной приемки трубопровода после сварки [14]. Трубы проверяются раздельно: прессуются отдельно подающий и отдельно обратный трубопроводы. Это связано с тем, что если поднимать давле-

ние одновременно в двух трубах, то возникают нерасчетные нагрузки на неподвижные опоры [15].

Во избежание ожогов персонала и окружающего населения температура воды должна быть не ниже 5 °С и не выше 40 °С. При заполнении оборудования водой воздух из него должен быть удален полностью. Давление в испытуемом оборудовании следует поднимать плавно и равномерно. Общее время подъема давления (до значения пробного) должно быть указано в технологической документации. Давление воды при гидравлическом испытании следует контролировать не менее чем двумя манометрами. Оба манометра выбирают одного типа, предела измерения, одинаковых классов точности (не ниже 1,5) и цены деления. Использование сжатого воздуха или другого газа для подъема давления в оборудовании (как это делается для ИТП [8]), заполненном водой, не допускается.

Моделирование гидравлических режимов, выполненное в соответствии с формулами (1–7), не только дало понимание величины рабочего давления в каждой точке сети, но и показало оптимальную величину испытательного давления (рис. 1).

Время выдержки под пробным давлением трубопроводов пара и горячей воды устанавливается программой испытаний, оно должно быть не менее 10 мин. При гидравлическом испытании трубопровод считают выдержавшим испытание, если не будет обнаружено:

- течи, потения в сварных соединениях и в основном металле;
- видимых остаточных деформаций;

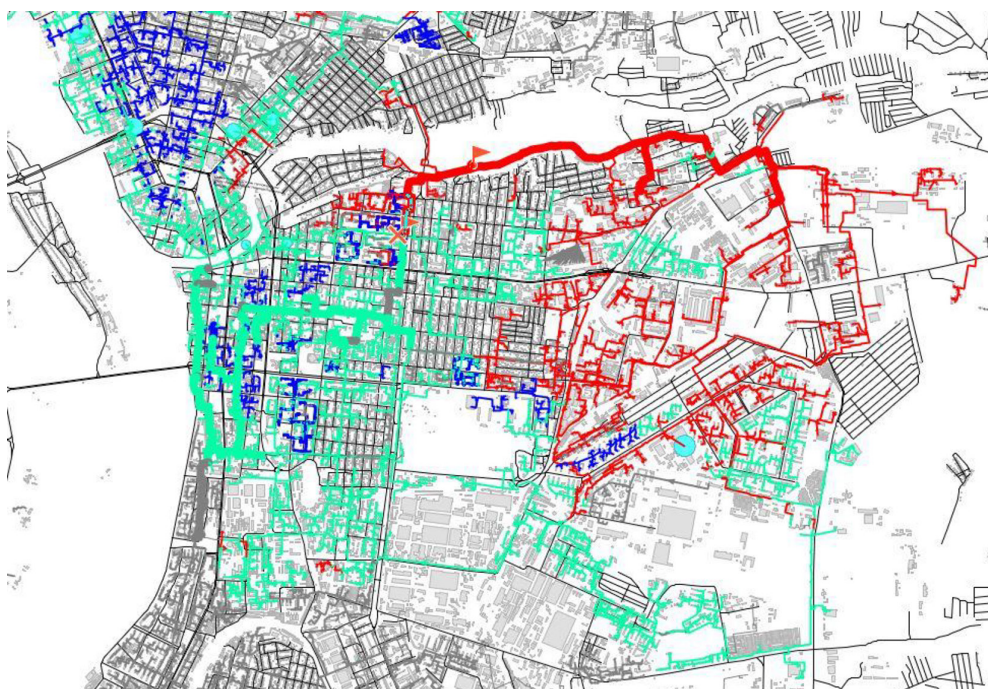


Рис. 1 Распределение трубопроводов от ТЭЦ-5 г. Омска по диапазонам величины испытательного давления в соответствии с цветовой схемой

Fig. 1 Schematic of Omsk District Heating Network (combined heat-and-power plant – CHPP#5): the pipelines distributed according to levels of the test pressure

трещин или признаков разрыва;
падения давления по манометру.

Следует отметить, что летние испытания тепловых сетей, находящихся на балансе АО «Омск РТС», подразделяются на два типа:

1. Общие (магистральных трубопроводов от ТЭЦ) проводят по окончании отопительного периода.

2. Испытания отдельных участков магистральных трубопроводов с использованием насосных станций проводят в течение неотопительного периода по результатам первых испытаний [13].

Были проанализированы данные по магистральным тепловым сетям от всех источников г. Омска за последние два полных года. Наиболее наглядные зависимости изображены на рис. 2.

Вертикальными пунктирными линиями обозначены моменты начала и окончания отопительного периода. Красной горизонтальной линией нанесен уровень предельно-допустимой концентрации. Заметно значительное повышение содержания кислорода в летний период, неизменно связанный с проведением гидравлических испытаний на плотность и прочность. В отдельные дни отмечаются критически высокие уровни, превышающие 50 мкг/дм^3 . В целом в течение года значение содержания кислорода по подающим линиям находится вблизи отметки 20 мкг/дм^3 .

На рис. 3 показано аналогичное распределение для обратного трубопровода.

Ситуация повторяется: резкие скачки наблюдаются непосредственно перед началом отопительного периода, что также может быть связано с проведением гидравлических испытаний. Отмечен значительно меньший средний уровень растворенного кислорода относительно подающих трубопроводов.

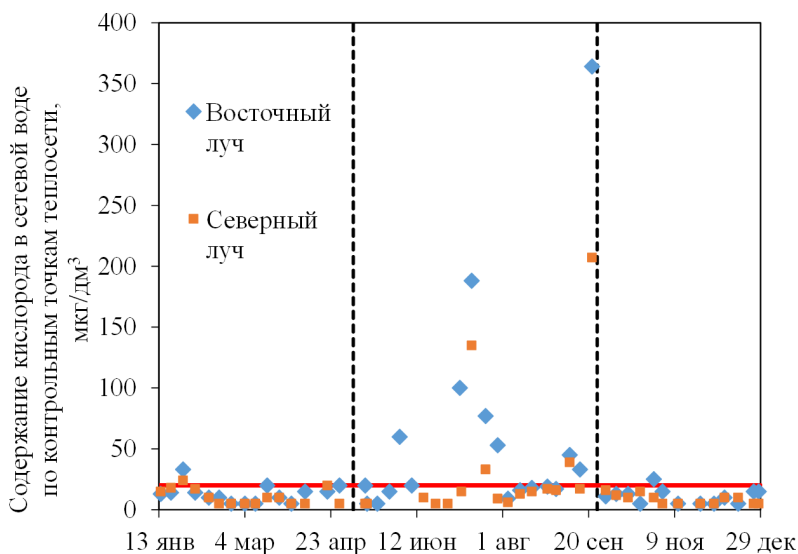


Рис. 2. Распределение значения содержания кислорода в сетевой воде подающего трубопровода по контрольным точкам теплосети в течение 2020 г.

Fig. 2. Concentration of dissolved oxygen among the control point during 2020: supply line

Для обеих диаграмм характерно очевидное отличие результатов в ходе каждого из замеров, что подтверждает, что не водоподготовка на источнике теплоснабжения играет решающую роль. Кроме того, уровень значения содержания кислорода в сетевой воде трубопроводов Северного луча преимущественно ниже соответствующих величин для Восточного луча. Это может свидетельствовать о лучшем состоянии первого.

Нужно понимать, что к существенному повышению концентрации кислорода приводят не сами гидравлические испытания в части их механического воздействия на стенки трубопровода, а мероприятия, обеспечивающие безопасность их проведения, а именно: постепенное замещение теплоносителя холодной недеаэрированной водой перед проведением гидравлических испытаний (расхолаживание) и последующий спуск холодной воды и заполнение трубопровода горячей.

По окончании ремонтов трубопроводы заполняются частично деаэрированной (обычно обратной сетевой водой). Однако и в этом случае возможно резкое увеличение содержания кислорода в воде за счет кислорода воздуха заполняемого трубопровода [16].

Впервые метод опрессовки на прочность повышенным давлением был применен в 1976 г. в ТС ОАО «Мосэнерго». Обоснование метода и прочностные расчеты проводили в ВТИ в 1975 г. С тех пор испытания проводятся ежегодно с незначительным изменением величины давления и времени его выдержки раздельно по подающей и обратной трубе. Метод применялся и был разработан с целью выявления ослабленных мест трубопровода в ремонтный период и исключения появления повреждений в отопительный период. Он имел долгий период освоения и внедрения, но, к сожалению, как показывает практика, эффективность гидравлических испытаний не является 100 %-ной и, несмотря на их проведение, все же возможность возникновения повреждений в зимний период остается. К примеру, на тепловых сетях г. Москвы в настоящее время в среднем стабильно обозначена эффективность 93–94 % [15].

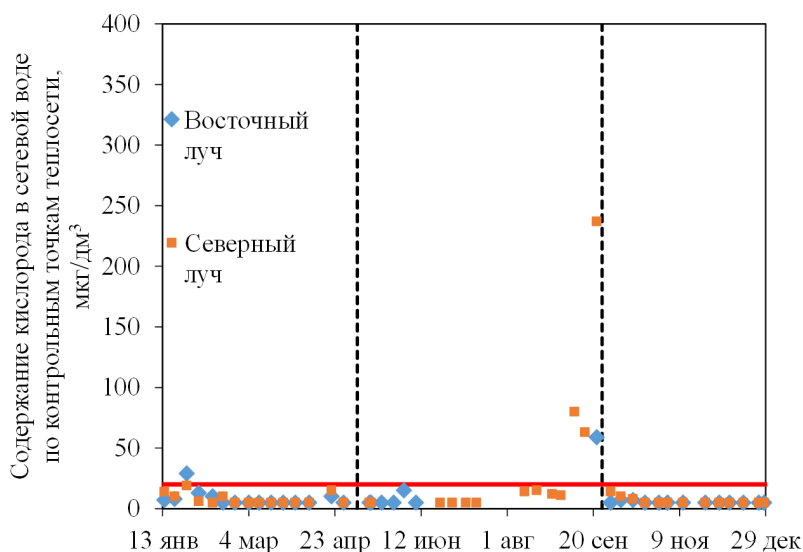


Рис. 3. Распределение значения содержания кислорода в сетевой воде обратного трубопровода по контрольным точкам теплосети в течение 2020 г.

Fig. 3. Concentration of dissolved oxygen among the control point during 2020: return line

Среднее по г. Омску значение показывает, что порядка 70 % повреждений выявляется в ремонтный период, выявление оставшихся уходит на период отопления, величина повреждаемости может значительно отличаться в зависимости от участка (рис. 4).

Наряду с преимуществами гидравлические испытания несут и отрицательные последствия. Имеется целый комплекс факторов их негативного воздействия на функционирование системы теплоснабжения. С точки зрения потребителя, основным недостатком является необходимость многократного и длительного отключения централизованного ГВС. В связи с необходимостью проведения опрессовок в зонах снабжения энергоисточников прекращение подачи горячей воды происходит как минимум дважды: после окончания отопительного сезона, перед началом ремонтной кампании, и повторно перед началом отопительного сезона. Неудовлетворительные результаты первых повторных испытаний часто приводят к необходимости проведения следующих испытаний. Имеются примеры, когда гидравлические испытания в крупных зонах теплоснабжения проводили за летний период до четырех раз [14].

Проведение любого гидравлического испытания влечет полное прекращение ГВС потребителей, которое не должно превышать 14 суток в период ежегодных профилактических ремонтов. С начала 1970-х и до 2008 г. нормативный срок допустимого перерыва ГВС не рассматривался, и только в 2009 г. под давлением Роспотребнадзора сроки планового отключения ГВС потребителей были приведены в соответствие с требованиями [13, п. 3.1.11] и сокращены до 14 суток.

Кроме того, последствием гидравлических испытаний, приводящим к увеличению перерывов в ГВС потребителей, является образование множества повреждений на тепловых сетях.

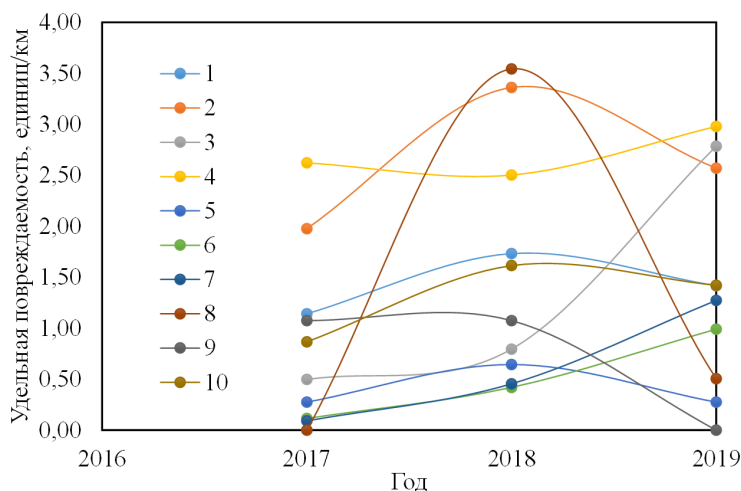


Рис. 4. Удельная повреждаемость трубопроводов тепловой сети: 1 – V Восточный луч, 2 – I Восточный луч, 3 – V Западный луч, 4 – I Западный луч, 5 – Релеро, 6 – Северный луч, 7 – V Южный луч, 8 – I Южный луч, 9 – «Октябрьский» луч, 10 – среднее по источнику

Fig. 4 Failure rate for each transmission pipeline for 2017-2019: (1) 5th 'East' main, (2) 1st 'East' main, (3) 5th 'West' main, (4) 1st 'West' main, (5) 'Relero' main, (6) 'North' main, (7) 5th 'South' main, (8) 1st 'South' main, (9) 'October' main, (10) median

Очевидно, что актуальна задача сокращения сроков проведения опрессовки, однако такое сокращение ни в коем случае не должно повлиять на качество ремонтной кампании. В целом сокращение сроков направлено:

на сокращение времени перерывов ГВС и обеспечение эпидемиологической безопасности населения;

на увеличение выработки электроэнергии на ТЭЦ, работающей в комбинированном режиме, и объемов реализации тепловой энергии потребителям [18];

на снижение социальной напряженности.

Имеется разработанная и внедренная методика опрессовки теплосетей, которая позволяет проводить ее всего за три дня [19].

Еще один важный фактор отрицательного влияния гидравлических испытаний на качество ГВС потребителей обусловлен тем, что после их проведения и до начала подачи горячей воды потребителям из-за ограниченной пропускной способности канализационной системы невозможно успеть сдrenировать всю холодную воду из тепловых сетей. Поэтому ее вытеснение частично осуществляется через водоразбор потребителей. При этом на водоразбор поступает вода с температурой 20–30 °С [16], что намного ниже нормативных требований [20].

Резкое изменение параметров сетевой воды (температуры, давления) – это ярко выраженное стрессовое воздействие на структуру металла трубопроводов, что приводит к сокращению эксплуатационного ресурса тепловых сетей [21]. Достаточно сравнить количество порывов во время проведения гидравлических испытаний и после их проведения. Все порывы после них – это следствие возникновения новых и подрастания мелких ранее неопасных трещин до раскрытия, т. е. порывов. Причем если при проведении испытаний трубопровод тепловой сети разрушится, то без их проведения он мог бы эксплуатироваться при рабочем давлении еще не один год, тем самым опрессовки существенно снижают долговременную прочность ТС [22]. Это вызвано возрастанием скорости протекания коррозионных процессов (так называемой коррозии под напряжением), причем каждое последующее проведение ГИ будет увеличивать скорость протекания как общих, так и локальных коррозионных процессов [23]. Последние исследования [24] показали, что уровень кольцевых напряжений при гидравлических испытаниях труб большого диаметра выше, чем в трубах малого диаметра, однако темпы роста этих напряжений для последних выше, причем кольцевые напряжения, возрастающие за счет протекания коррозионных процессов, достигают критических значений для труб малого диаметра в среднем через 15 лет, а для труб большого диаметра через 15–20 лет эксплуатации [25].

Масштабность этого метода контроля, несомненно являясь его достоинством, к сожалению, может быть и его недостатком, так как не всегда имеется возможность выборочного испытания отдельных участков трубопроводов тепловых сетей, что приводит к снижению пластичности и работы разрушения новых труб.

Для учета прогресса и понимания величины испытательного давления на каждом участке тепловой сети целесообразно создание программных комплексов на базе единой геоинформационной службы (рис. 5), подобно описанным в [26].

Данная система для поддержания надежности СЦТ г. Омска и обеспечения безопасности ее граждан позволяет в короткий летний (ремонтный) период найти самые опасные места и локально заменить их старые трубы. Требуется перебрать данные о состоянии теплопроводов

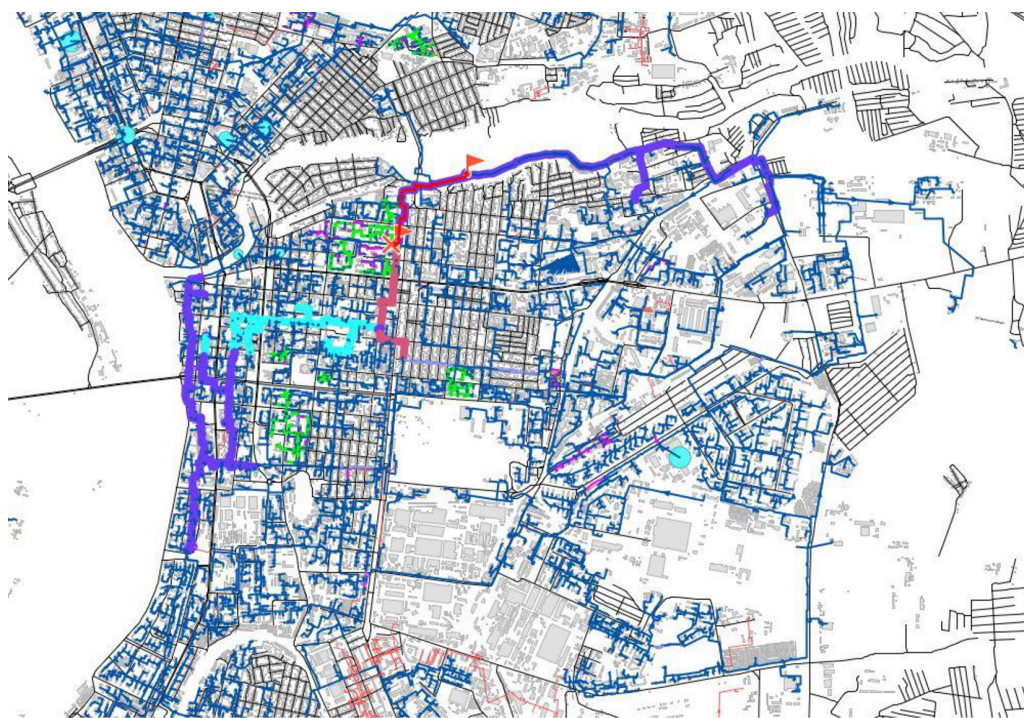


Рис. 5. Результат моделирования и проведения испытаний на плотность и прочность, отображаемый в виде цветовой раскраски на базе программы ZuluThermo ГИС Zulu

Fig. 5. Results: colored layout of test pressures within ZuluGIS© (ZuluThermo© add-on)

на длине свыше двух сотен километров и выбрать участки, в первую очередь требующие реконструкции или капитального ремонта.

Еще один негативный момент заключается в том, что тепловые схемы большинства ТЭЦ и котельных не обеспечивают возможности охлаждения деаэрированной воды до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, в связи с чем перед проведением испытаний сети заполняются холодной водой напрямую из городского водопровода, что приводит к образованию множественных очагов развития внутренней коррозии трубопроводов и дальнейшей активизации этого процесса на уже имеющихся очагах, следствием чего является сокращение эксплуатационного ресурса тепловых сетей относительно расчетных значений [26, 27].

Соотношения разрывов трубопроводов ТС в ремонтный и эксплуатационный периоды г. Омска представлены на диаграмме (рис. 6).

При разрывах каналы заполняются водой, в них появляется намыв грунта, следовательно, при замене одного участка соседние участки начинают корродировать [21].

Необходимость оперативно устранить выявленное повреждение приводит к необходимости дополнительного, перед началом проведения основной ремонтной кампании, отключения участка сети и спуска воды, попавший при этом в трубопровод воздух также усугубляет коррозионный процесс.

Все это заставляет относиться к проведению гидропрессовок повышенным давлением двояко: с одной стороны, как к процедурам, надежно выявляющим элементы, находящиеся

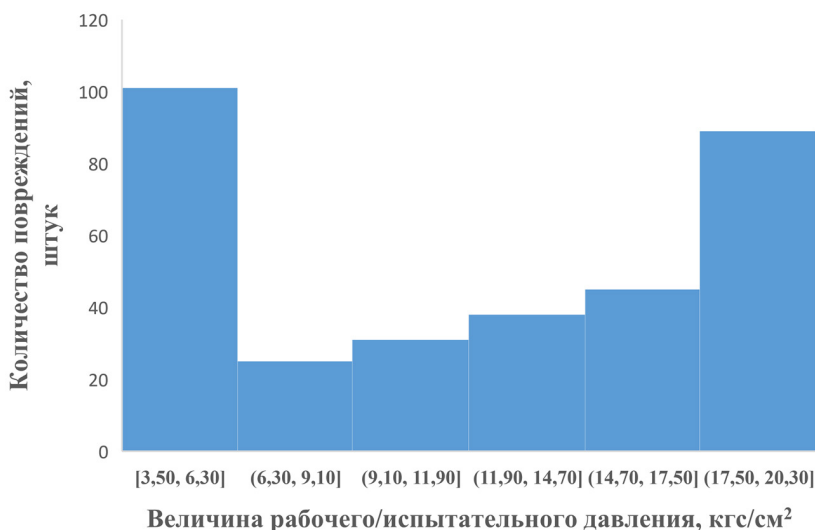


Рис. 6. Гистограмма повреждаемости по годам (1967–2021)

Fig. 6. Parameter estimates of the eight construction archetypes (1967–2021)

в состоянии предразрушения, с другой – как к процедурам, провоцирующим ускоренное развитие локальных коррозионных повреждений (рис. 7).

Приведенная выше информация о соотношении разрывов трубопроводов теплосетей в ремонтный и эксплуатационный периоды позволяет говорить и о недостаточности таких мероприятий. Проведение гидроиспытаний не выявляет всех скрытых повреждений трубопроводов тепловых сетей, не исключает повреждаемость трубопроводов в отопительном сезоне [20].

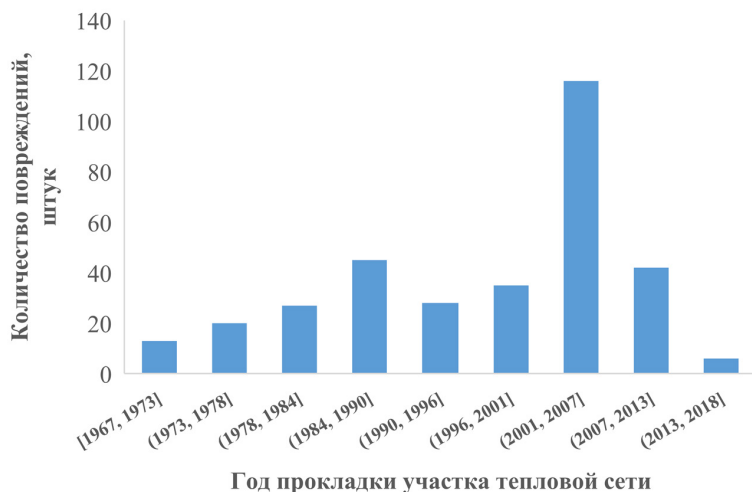


Рис. 7. Гистограмма частот по давлениям

Fig. 7. The distribution of the estimated pressures for the failures (histogram based on the median value of each pressure)

Одна из причин такого положения дел состоит в том, что цель таких испытаний заключается в разрушении всех слабых мест трубопроводов с толщиной стенки до 1 мм. Для разрушения труб большого диаметра обычно достаточно давления 2,5–3,0 МПа (25–30 кгс/см²). Малые диаметры труб требуют повышенных давлений, что трудно выполнимо в производственных условиях [15]. Кроме того, на участках тепловых сетей, геодезическая отметка которых ниже, чем в точке размещений опрессовочных насосов, может наблюдаться чрезмерное испытательное давление, при его снижении участки вблизи насоса остаются неопрессованными (рис. 8).

Важны при этом и вопросы техники безопасности. Есть сведения о случаях, когда поднимало плиты, слетали люки при разрывах. При выявлении причин этого оказывалось, что не всегда тщательно выпускается воздух из тепловых сетей. Требуется уделять пристальное внимание со стороны начальника района и других ответственных за опрессовку лиц к воздушникам, их исправность позволяет предупредить такие ситуации. В отдельных случаях, особенно в людных местах, гидравлические испытания проводятся в ночное время, для того чтобы при разрывах не было никаких несчастных случаев с людьми [7].

При проведении опрессовок возрастает вероятность нанесения ущерба третьим лицам, а также несчастных случаев с людьми, как следствие, образования повреждений на тепловых сетях [18]. При бесканальной прокладке теплопроводов весьма опасной может быть осадка земли с образованием воронок.

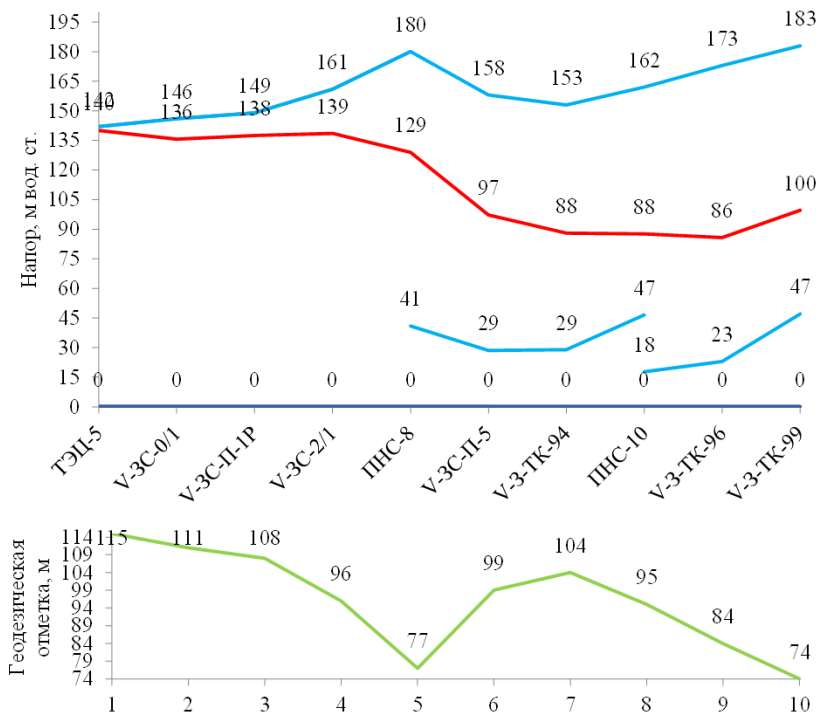


Рис. 8. Результаты моделирования испытаний Западного луча ТЭЦ-5 г. Омска, синей линией показаны величины испытательного давления с учетом геодезической отметки (зеленая кривая), красной – без учета

Fig. 8. Comparison of pressure profiles along 'West' transmission pipeline (CHPP#5, Omsk, Russia): simple data series are depicted with red; if terrain height (green) is taken into account – blue

Возникает вопрос, можно ли вообще отказаться от летних гидравлических испытаний городских тепловых сетей повышенным давлением. Известен лишь один прецедент, когда тепло-снабжающая организация г. Санкт-Петербурга согласовала с Ростехнадзором отказ от испытаний. Этому предшествовала серьезная методическая работа: руководством ОАО «Теплосеть Санкт-Петербурга» совместно с ОАО «ТГК-1» была проведена очень большая организационно-разъяснительная работа с городской администрацией и Ростехнадзором по Северо-Западному федеральному округу, направленная на согласование замены ежегодных гидравлических испытаний тепловых сетей на плотность и прочность в зонах сохранения циркуляции в межотопительный период альтернативными методами неразрушающей дефектоскопии, в т. ч. тепловой инфракрасной аэросъемкой [26, 27].

Основная аргументация в пользу допустимости замены гидравлических испытаний альтернативными методами неразрушающего контроля сводилась к ссылке на п. 169 ныне действующих нормативных документов, а также разъяснительное письмо по этому вопросу Управления по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора по городу Санкт-Петербургу (№ 11/2567 от 21.04.2006 г.) [28]. Тревожным моментом является то, что и общий новостной фон в федеральных СМИ и анализ более специализированных источников новостной информации позволяют сделать вывод о наличии не только положительных последствий от данного внедрения.

Заключение

Основной метод определения технического состояния участков тепловых сетей – гидравлические испытания на плотность и прочность (опрессовки). С точки зрения абонента, основным недостатком их проведения является необходимость отключения централизованного ГВС и возможное последующее значительное снижение температуры горячей воды, поступающей на водоразбор потребителей. Опрессовки существенно снижают долговременную прочность ТС, что происходит из-за резкого изменения параметров сетевой воды. Сравнение количества порывов во время проведения гидравлических испытаний и после позволяет сделать вывод о недостаточности таких мероприятий. Необходимо уделить внимание и вопросам техники безопасности. Обобщая вышеизложенный материал, предлагаем:

- проанализировать эффективность гидравлических испытаний на магистральных трубопроводах АО «Омск РТС», проведя разбивку по территориальным единицам (тепловым районам) предприятия;
- рассмотреть вопросы определения оптимальной величины пробного давления и вопросы проведения опрессовок с помощью передвижных насосных установок;
- проверить информацию о случаях микробиологического заражения внутренней поверхности стенок трубопроводов при применении этого вида диагностики;
- выявить положительные и отрицательные итоги отказа от проведения летних гидравлических испытаний на примере опыта компании «Теплосеть Санкт-Петербурга».

С применением комплексной оперативной системы сбора и анализа данных о состоянии теплопроводов опрессовку стало возможным рассматривать как метод диагностики и планирования ремонтов в соответствии с полученной по каждому участку (лучу) тепловой сети повреждаемостью. Показана связь между гидравлическими испытаниями, содержанием кисло-

рода в сетевой воде и внутренней коррозией. Требуется изменение существующего порядка заполнения и запуска системы. Необходима дальнейшая проработка имеющихся у автора предложений. В их числе заполнение системы только деаэрированной водой; сокращение времени заполнения путем уменьшения объема (длины) заполняемых участков, в частности проведение самих гидравлических испытаний только после врезки новых участков трубопроводов взамен старых с локализацией их фланцевыми заглушками.

Список литературы / References

- [1] Xue, P., Jiang, Y., Zhou, Z., Chen, X., Fang, X., & Liu, J. (2020). Machine learning-based leakage fault detection for district heating networks. *Energy and Buildings*, 223, 110161. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110161.
- [2] Hong, M.-S., So, Y.-S., Lim, J.-M., & Kim, J.-G. (2021). Evaluation of internal corrosion property in district heating pipeline using fracture mechanics and electrochemical acceleration kinetics. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 94, 253–263. doi:10.1016/j.jiec.2020.10.048.
- [3] Слепченко В. С. *Опыт эксплуатации коммунального теплоэнергетического предприятия*. СПб.: ПЭИПК, 2003 [Slepchenok V. S. *Opyt ekspluatatsii kommunal'nogo teploenergeticheskogo predpriyatiya*. SPb.: PEIPK, 2003 (in Russian)].
- [4] Chicherin, S., Zhuikov, A., Junussova, L., Yelemanova, A. Multiple-fuel District Heating System of a Transportation Facility: Water Performance-based View. *Transportation Research Procedia*, 2021, 54, 31–38.
- [5] Балабан-Ирменин Ю. В. *Изучение и предотвращение коррозии металла трубопроводов в воде тепловых сетей*. М.: ВТИ, 2002. 42 с. [Balaban-Irmenin Yu. V. *Study and prevention of corrosion of the metal of pipelines in the water of heating networks*. М.: VTI, 2002. 42 p. (in Russian)].
- [6] Чичерин С. В. Резервы снижения тепловых потерь сетей и повышения надежности теплоснабжения: анализ проектной и исполнительной документации. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020, 1(78), 204–215. [Chicherin S. V. Reserves for reducing heat losses of networks and increasing the reliability of heat supply: analysis of design and executive documentation. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture*, 2020, 1(78), 204–215 (in Russian)].
- [7] Куриленко Н. И., Кузьменко К. Е. Актуализация методов проведения испытаний на тепловых сетях. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021, 23(1), 116–125. [Kurylenko N. I., Kuzmenko K. E. Actualization of testing methods on heating networks. *Bulletin of the Tomsk State Architectural and Construction University*. 2021, 23(1), 116–125 (in Russian)].
- [8] Чичерин С. В. Проблемы обеспечения теплогидравлических режимов как причина перехода на локальный источник теплоснабжения. *Строительство и реконструкция*. 2019, 6(86), 106–117 [Chicherin S. V. Problems of providing thermohydraulic modes as the reason for the transition to a local source of heat supply. *Construction and reconstruction*. 2019, 6(86), 106–117 (in Russian)].
- [9] Чичерин С. В., Жуйков А. В. Вспомогательное оборудование ИТП, позволяющее обеспечить качественные показатели теплоснабжения. *СОК*. 2020, 3(219), 42–45 [Chicherin S. V.,

Zhuikov A. V. Auxiliary equipment of ITP, allowing to provide high-quality indicators of heat supply. *SOK*. 2020, 3 (219), 42–45 (in Russian)].

[10] Колосов М.В., Жуйков А.В. Оптимизация параметров и конфигураций тепловых сетей. *Промышленная энергетика*. 2013, 7, 21–22 [Kolosov M. V., Zhuikov A. V. Optimization of parameters and configurations of heating networks. *Industrial energy*. 2013, 7, 21–22 (in Russian)].

[11] Carvalho, A., Costa, R., Neves, S., Oliveira, C. M., Bettencourt da Silva, R. J. N. Determination of dissolved oxygen in water by the Winkler method: Performance modelling and optimisation for environmental analysis. *Microchemical Journal*, 2021, 165, 106129. doi:10.1016/j.microc.2021.106129.

[12] Chicherin, S., Anvari-Moghaddam, A. Adjusting heat demands using the operational data of district heating systems. *Energy*, 2021, 235, 121368. doi:10.1016/j.energy.2021.121368.

[13] Громов Н.К. Эксплуатация тепловых сетей. *Новости теплоснабжения*, 2004, 6(46) [Gromov N. K. The district heating distribution system maintenance. *Novosti teplosnabzheniya*, 2004, 6(46) (in Russian)].

[14] Липовских В.М. Опыт опрессовки трубопроводов тепловых сетей на повышенное давление. *Новости теплоснабжения*. 2001, 6(10). [Lipovskikh V.M. The upper pressure tests experience of district heating pipelines. *Novosti teplosnabzheniya*, 2001, 6(10) (in Russian)].

[15] Гончаров А.М. Методы диагностики тепловых сетей, применяемые в реальных условиях эксплуатации действующих тепловых сетей ОАО МТК. *Новости теплоснабжения*. 2007, 6(82). [Goncharov A. M. The diagnosis process methods of the distribution system within actual maintenance of «МТК», JSC working heating utility pipelines. *Novosti teplosnabzheniya*, 2007, 6(82) (in Russian)].

[16] Babiartz B. Niezawodność podsystemu dostawy ciepła. *Journal of KONBiN*, 2015, 3 (35), 15–22.

[17] Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.4.1074–01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения» Москва, 2002. [SANPIN2.1.4.1074–01 Potable Water – Hygienic Requirements for Water Quality in Central Potable Water Supply Systems – Quality Control]. Moscow, 2002 (in Russian)].

[18] Lund H. et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 2014, 68, 1–11.

[19] Орехов В.Н. Методика сокращения сроков опрессовки тепловых сетей на примере ОАО «ТЕВИС» г. Тольятти. *Новости теплоснабжения*, 2011, 10(134). [Orekhov V.N. Shortening a pressure test cycle of the district heating distribution system within «TEVIS», JSC. *Novosti teplosnabzheniya*, 2011, 10(134) (in Russian)].

[20] Рожков Р.Ю. Управление режимом теплоснабжения в зоне эксплуатационной ответственности ОАО «Теплосеть Санкт-Петербурга». *Новости теплоснабжения*, 2012, 1(137). [Rozhkov R.YU. The administering the heating regime of the «St. Petersburg Heating Grid», JSC operation area. *Novosti teplosnabzheniya*, 2012, 1(137) (in Russian)].

[21] Матвеев В.И., Алибеков С.Я. Последствия проведения гидравлических испытаний и альтернативные пути обеспечения надежной эксплуатации тепловых сетей. *Новости теплоснабжения*. 2007, 8(84). [Matveyev V.I., Alibekov S.YA. The pressure test adverse effect and

alternatives of ensuring the district heating systems failure-free maintenance. *Novosti teplosnabzheniya*, 2007, 8(84) (in Russian)].

[22] Скоробогатых В.Н., Попов А.Б., Жарикова О.Н., Ротмистров Я.Г., Агапов Р.В., Алимов Х.А. Определение оптимальных параметров гидравлических испытаний тепловых сетей. *Новости теплоснабжения*, 2008, 7. [Skorobogatykh V.N., Popov A.B., ZHarikova O.N., Rotmistrov YA. G., Agapov R.V., Alimov KH.A. Selecting the rational testing mode of heating utility pipelines hydraulic tests. *Novosti teplosnabzheniya*, 2008, 7 (in Russian)].

[23] Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Глухих М.В., Филиппов Г.А. и др. Анализ влияния скорости коррозии на изменение конструктивной прочности труб тепловых сетей и установление кинетической зависимости влияния этих изменений на уровень напряжений при рабочих и испытательных давлениях. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2009, 3, 43–51. [Pleshivtsev V.G., Pak YU.A., Glukhikh M.V., Filippov G.A. et al. The impact analysis of the corrosion rate на изменение alteration in strength of heating utility pipelines dependence of the impact of these changes on the value of collapsing pressure during working and trial pressure operation. *Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye*, 2009, 3, 43–51 (in Russian)].

[24] Nilsson S. F. New developments in pipes and related network components for district heating. *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, 2016, 01, 191–214.

[25] Hlebnikov A. et al. Damages of the Tallinn district heating networks and indicative parameters for an estimation of the networks general condition. *Scientific Journal of Riga Technical University. Environmental and Climate Technologies*, 2010, 5(1), 49–55.

[26] Zhou S., O'Neill Z., O'Neill C. A review of leakage detection methods for district heating networks. *Applied Thermal Engineering*, 2018. 137, 567–574. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.010.

[27] Hossain K., Villebro F. Forchhammer SUAV image analysis for leakage detection in district heating systems using machine learning. *Pattern Recognition Letters*, 2020, 140, 158–164. doi:10.1016/j.patrec.2020.05.024.

[28] Пути решения проблемы повышения качества и надежности горячего водоснабжения потребителей в зоне эксплуатационной ответственности ОАО «Теплосеть Санкт-Петербурга». Режим доступа: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=230 (дата обращения: 27.02.2021). [The ways to deal with an improving hot water supply system performance and reliability of the «St. Petersburg Heating Grid», JSC operation area] Available at: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=230 (accessed 27 February 2021) (in Russian)].шго