

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ГОРОДА КИЕВА

Р.И. Дмитриенко¹, П.С. Юхимец¹, В.М. Тороп¹, И.Н. Кисель¹, В.Н. Егоренко²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²КП «Киевтеплоэнерго». 01001, г. Киев, пл. И. Франка, 5. E-mail: yehorenko.vn@kte.kmda.gov.ua

Проанализированы факторы, влияющие на повреждаемость тепловых сетей. Представлен анализ фактической повреждаемости тепловых сетей в последние годы на примере города Киева. Проведена оценка эффективности проводимых сезонных гидравлических испытаний. Библиогр. 22, рис. 6.

Ключевые слова: тепловые сети, порывы, повреждаемость, гидравлические испытания, коррозия, дефекты, пробное давление

Проблемы, связанные с изношенностью городских тепловых сетей, являются общими для многих городов, и в разных странах они решаются по-разному. В представленной работе рассмотрен вопрос, связанный с украинскими реалиями на примере города Киева, который может быть довольно показательным. Большая часть тепловых сетей Киева проектировалась и вводилась в эксплуатацию до 1990 г., поэтому имеет много общего с сетями стран бывшего СССР. Сюда же относятся и проблемы, связанные с их изношенностью. Представленный ниже анализ повреждаемости тепловых сетей проведен по данным, которые были представлены специалистами ПАО «Киевэнерго». Объектом исследования является повреждаемость трубопроводов тепловых сетей города Киева и влияющие на нее факторы.

Анализ нормативной документации. Подробные результаты исследований, включая анализ нормативной документации и литературных данных, статистическую обработку, расчетные данные, лабораторные гидравлические испытания и испытания на коррозию приведены в материалах технического отчета [1].

Согласно правил [2], ежегодно, после ремонта, до начала отопительного сезона, тепловая сеть подвергается гидравлическим испытаниям (ГИ) пробным давлением на прочность и герметичность. Проведения ГИ оговариваются в соответствующей нормативной документации (НД). Требования, действующей НД Украины, регламентируют минимальные значения давления при проведении ГИ (одинаковые как для подающего, так и обратного трубопроводов), и соответствуют превышению в 1,25 раза по отношению к рабочему давлению. Рабочее давление закладывается в проектной документации и является одинаковым как для подающего, так и обратного

трубопроводов. Требования к минимальному давлению, температуре воды и продолжительности проведения ГИ являются общими для всей НД. Температура воды при ГИ не должна превышать 40 °С, время выдержки под давлением не менее 10 мин. При этом, согласно [2–4], независимо от того подающий это или обратный трубопровод, минимальные значения не могут быть меньше 1,6 МПа – для магистральных и 1,2 МПа – для распределительных трубопроводов, соответственно. Выполнение этих требований обуславливает повышение давления в обратных трубопроводах во время ГИ в 4...6 раз по отношению к их эксплуатационному давлению. Согласно [4, 5], эти минимальные давления должны составлять не ниже 1,6 МПа и должны выдерживаться в наивысших точках трубопроводных систем (возвышенностях на местности). В самых низших точках этих же систем (низинах на местности), с учетом добавления давления водяного столба, обусловленного разницей геодезических высот, эти давления будут еще выше. Отметим, что в российской НД [6] испытания пробным давлением подающих и обратных трубопроводов производятся отдельно, что не исключает возможности разных давлений при испытаниях.

Анализ литературных данных. Процессы общей и локальной коррозии являются одним из главных факторов снижения эксплуатационной стойкости трубопроводов тепловых сетей, деформационного старения, а также ухудшения механических характеристик и сопротивления металла разрушению. Коррозия приводит к уменьшению толщины стенки трубы, возникновению концентраторов напряжений, снижению сопротивления зарождению и распространению трещины [7]. Как внутренняя, так и внешняя коррозия, может быть как локальной (язвенной), так и равномерной сплошной. Причины, вызывающие сплош-

Дмитриенко Р.И. – <https://orcid.org/0000-0001-8842-5051>, Тороп В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>,

Юхимец П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Кисель И.Н. – <https://orcid.org/0000-0002-4550-8065>

© Р.И. Дмитриенко, П.С. Юхимец, В.М. Тороп, И.Н. Кисель, В.Н. Егоренко, 2020

ную внутреннюю коррозию, разные. Наиболее частыми причинами внутренней коррозии являются: «подсос» в тепловую сеть сырой воды, а также развитие стояночной коррозии. Коррозионные язвы чаще всего развиваются под слоем накипи и продуктами коррозии. Согласно [8], основными причинами коррозии, приводящей к повреждениям, являются: протекания грунтовых вод сверху – 34,4 %, некачественная сетевая вода – 21 %, подтопление трубопровода – 16,3 %. При этом основными типами повреждений вследствие внутренней и внешней коррозии являются сквозные дефекты и разрывы труб. Наименее опасным и легко прогнозируемым повреждением является сплошная равномерная коррозия. Общая равномерная и местная коррозия – пятнами или язвами, могут развиваться одновременно, но с разными скоростями. Повышение коррозионной повреждаемости на подающих трубопроводах может быть связано с более высоким давлением и температурой сетевой воды, а также большим аэрированием. На обратном трубопроводе эти факторы коррозионного повреждения металла действуют в меньшей степени (растворенные газы, проходя по подающим трубопроводам, взаимодействуют с металлом трубы и снижают свою активность). Основные причины, которые могут вызвать ускоренную коррозию и порывы на обратных трубопроводах: стоячая вода в трубах после проведения ГИ и низкий гидравлический напор в трубах (механизм коррозионного поражения такой же, как и при стояночной коррозии) [9]. С увеличением содержания углерода и легирующих элементов в трубных сталях, наблюдается увеличение скорости коррозии [10]. Предварительная пластическая деформация более 0,1 % низколегированных трубных сталей (кроме стали 20), также приводит к увеличению скорости коррозии [11]. В [12], например, устанавливаются требования к предельной скорости наружной коррозии труб – 0,03 мм/г. Там же предписывают вести систематический контроль за внутренней коррозией по специально закладываемым во внутрь труб пластинам – индикаторам коррозии.

В настоящее время коррозионные повреждения теплопроводов обычно выявляются при проведении гидравлических и температурных (на максимальную температуру теплоносителя) испытаний. В Киеве температурные испытания не проводились с 1999 г. Наиболее эффективные и безопасные испытания повышенным давлением проводятся при температуре воды не более 40 °С. Целью указанных испытаний является выявление участков трубопроводов тепловых сетей, на которых подрастание дефектов в течение следующего года приведет к сквозному повреждению те-

плопровода. С одной стороны, высокое пробное давление в трубах, поврежденных коррозией, надежно выявляет места, которые находятся в состоянии предразрушения, и способствует притуплению возможных трещиноподобных дефектов, остающихся после испытаний, что уменьшает вероятность их дальнейшего роста [13]. В то же время происходит развитие локальных пластических деформаций, которые усиливают процесс коррозии, и уменьшают запас пластичности стали [7, 8]. При этом местонахождение участков, подвергшихся перегрузкам, остается неизвестным. В работе [14] отмечается, что в процессе ГИ высоким давлением обратного трубопровода в разы превышает его эксплуатационное давление. При этом в местах наиболее сильных коррозионных повреждений, приводящих к утонению трубопровода, развиваются локальные пластические деформации, способствующие дальнейшей активизации процессов коррозионного разрушения металла. Локальный характер пластических деформаций усложняет непосредственное их определение, хотя они могут достигать 7 % и более [15]. Все это приводит к увеличению скорости коррозионных процессов в этих местах. Изменение локальных механических и коррозионных свойств металла трубопроводов теплосетей является результатом их деформационного старения. Деформационное старение с одной стороны повышает предел текучести, с другой – облегчает процесс зарождения и роста трещин и увеличение скорости коррозии.

В работах [7, 16] в результате комплексного исследования влияния длительной эксплуатации и ГИ установлено что:

- стандартные механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ и ψ) практически не зависят от срока эксплуатации;
 - длительная эксплуатация, также как и периодические нагрузки, имитирующие ГИ, приводит к снижению характеристик сопротивления разрушению таких как: работа зарождения трещин, ударная вязкость, хладостойкость, критическое раскрытие берегов трещины и т. п.;
 - характеристики сопротивления разрушению уменьшаются тем сильнее, чем дольше срок эксплуатации;
 - ГИ уменьшают срок службы теплосетей;
 - деградация свойств металла труб происходит из-за возникновения локальных микронапряжений, развития процесса деформационного старения и накопления дефектов в виде микротрещин.
- Таким образом, учитывая двойной характер испытаний повышенным давлением, его правильный выбор является чрезвычайно важным. Уровень давления во время ГИ должен быть таким,

чтобы он позволил «вскрыть» коррозионные повреждения трубопроводов, которые при дальнейшей, даже незначительной коррозии, будут разрушены в процессе эксплуатации рабочим давлением теплоносителя [17]. Как уже отмечалось, действующая система допустимого уровня испытательного давления трубопроводов тепловых сетей не учитывает продолжительность эксплуатации, степень коррозионного повреждения металла труб, процессов старения и деградации свойств. В работе [18] приведена методика определения максимального давления испытания с учетом действительной толщины стенки, скорости коррозии, величины диаметра и марки стали трубопровода, акцентируется внимание на локальность коррозионных явлений и нежелательность испытаний повышенным давлением на всем протяжении трубопровода. Дифференцированная система проведения ГИ [19] предлагает способ ГИ трубопроводов тепловых сетей повышенным давлением, при котором давление определяют с учетом предела текучести, скорости деградации, продолжительности эксплуатации и скорости коррозии металла трубопровода. Недостатками методики является сложность практического применения и отсутствие НД, обосновывающей и регламентирующей технологию проведения раздельного ГИ подающего и обратного трубопроводов с учетом их конкретной трассировки.

Результаты исследований. В рамках выполнения работы [1] были обследованы некоторые участки поврежденных трубопроводов, проанализированы температурные нагрузки и нагружения внутренним давлением, произведены прочностные расчеты одного участка реального трубопровода, проведены коррозионные и ударные испытания при разных температурах и уровнях предварительной пластической деформации.

Основными видами нагружений, которые влияют на трубопроводы тепловых сетей в процессе их эксплуатации являются переменные температура и внутреннее давление теплоносителя. На основании представленных ПАО «Киевэнерго» диаграмм наблюдений и табличных данных за 2011–2017 гг. по этим параметрам были сделаны следующие заключения.

Температура подающих трубопроводов магистральных и распределительных сетей в отопительный сезон колеблется в диапазоне приблизительно 60...100 °С. Изменение температуры обратных трубопроводов соответствует изменениям температуры подающих, но ниже на 10...30 °С. При этом разница температур более существенна в середине отопительного сезона. Температура подающих трубопроводов магистральных сетей в межотопительный сезон

составляет 63...65 °С. Температура подающих и обратных трубопроводов распределительных сетей, в межотопительный сезон, в силу того что они отключены, составляет 10...15 °С. Что же касается размахов (ΔT) температурных циклов в отопительный сезон, то около 80 % этих циклов имеет $\Delta T < 30$ °С. Циклы же с размахом в диапазоне $60 < \Delta T < 100$ °С составляют менее 5 % общего числа циклов с температурными колебаниями. При проведении ГИ температура может подниматься до 45 °С.

Давление в подающих магистральных трубопроводах в отопительный сезон практически постоянно. В зависимости от источника подачи тепла и диаметра трубопровода его величина варьируется в диапазоне 0,74...2,06 МПа. Давление же в обратных магистральных трубопроводах в этот период составляет 0,15...0,40 МПа. Что же касается межотопительного сезона, то давление в подающих магистральных трубопроводах также стабильно, но варьируется в диапазоне 0,49...1,81 МПа. В обратных магистральных трубопроводах давление составляет 0,15...0,62 МПа. Максимальное давление в отдельных случаях выше, чем в отопительный сезон. Отсюда видно, что эксплуатационные колебания давлений в течение года невелики. Основные циклы колебания давлений связаны с проведением ремонтных работ и ГИ. При проведении ГИ сначала испытывают магистральные трубопроводы, а затем, магистральные и распределительные. При проведении ГИ, подающие и обратные трубопроводы нагружаются совместно. Тем не менее, при такой методике, давление в обратном трубопроводе немного ниже (примерно на 5 %), чем в подающем. Проектные значения рабочих давлений составляют – 1,4; 1,6; 2,5 МПа, а при ГИ – 1,75; 2,0; 3,125 МПа, соответственно.

Отличительной характеристикой труб, которые используются в тепловых сетях, является высокий коэффициент запаса статической прочности, благодаря которому, напряжения, возникающие при эксплуатации невысоки, т. е. обеспечивается упругая работа металла. В таких условиях при отсутствии коррозии разрушение трубопровода маловероятно. Результаты обследований секций трубопроводов, вырезанных во время ремонта из действующих теплопроводов, показали, что наиболее распространенным видом повреждений является утонение стенки вследствие сплошной равномерной коррозии и локальные утонения. Локальные коррозионные язвы тоже достаточно распространены. Не редкий случай отслоения защитного покрытия на наружной стенке, что приводит к развитию внешней коррозии. На рис. 1, в качестве примера, приведены фото поврежденно-

го участка подающего трубопровода 325×8 мм из стали 10, эксплуатировавшегося в условиях непроеходной канальной прокладки. Защитное покрытие на внешней поверхности практически отсутствует. В ходе проведенных обследований на вырезанных фрагментах труб было установлено, что внешняя поверхность подверглась сплошной неравномерной коррозии, внутренняя – сплошной равномерной. Наружная коррозия более интенсивная, чем внутренняя. Коррозионные язвы на внешней поверхности имеют большую глубину, чем на внутренней. На довольно протяженных участках толщина стенки уменьшилась от 7...8 до 2...4 мм. Обратный трубопровод оказался более поврежден равномерной коррозией, хотя имеет тот же срок эксплуатации и изготовлен из той же стали, что и подающий. На некоторых участках как подающего, так и обратного трубопроводов, после удаления слоя продуктов коррозии выявлены сквозные коррозионные повреждения. Этот пример является типичным, и в целом, характеризует состояние системы. Стоит отметить, что после выявления сквозного повреждения часть трубы полностью вырезается и вместо нее сваривается новый фрагмент, минимальная длина которого 1 м.

Проведенные в рамках исследования расчеты указанного участка трубопровода (см. рис. 1) показывают, что температурные усилия при функционирующих компенсаторах дают меньший, либо сопоставимый вклад в напряженно-деформированное состояние, по сравнению с прибавкой от давления при ГИ. Это относится как к неповрежденному участку трубы, так и к зоне глубокого коррозионного дефекта. Также было выяснено, что температура и давление ГИ не вызывают напряжений текучести в трубе, если толщина стенки не является критически малой. Поэтому, с учетом этих факторов, несмотря на высокие значения коэффициента концентрации напряжений в коррозионных дефектах, возможность зарождения и

развития усталостной трещины в них, вследствие невысокого уровня номинальных напряжений и, соответственно, низкой амплитуды циклических деформаций практически исключена. Таким образом усталостную составляющую в повреждаемости можно не учитывать. Наиболее вероятной причиной разгерметизации труб является образование сквозного дефекта вследствие развития локального коррозионного процесса. Также возможными причинами резкого увеличения количества повреждений при увеличении температуры в осенний период (см. ниже), можно назвать: заклинивание сальниковых компенсаторов, сползание скользящих опор трубопровода с постаментов, отслаивание защитного покрытия трубы.

Анализ повреждаемости трубопроводов. Общая протяженность тепловых сетей города Киева в двухтрубном исполнении более 2000 км. При этом приблизительно 70 % этих сетей эксплуатируется более 30 лет. Структура сетей КП «Киевтеплоэнерго» выглядит следующим образом: «М – Магистральные трубопроводы»; «Р – Распределительные трубопроводы»; «ГВС – сети горячего водоснабжения». В 2013 г. протяженность магистралей увеличилась на такую же величину, на которую уменьшилась протяженность распределительных сетей – 159 км.

Первоначальная фиксация повреждений как при эксплуатации, так и при ГИ, проводится подразделениями, эксплуатирующими тот или иной трубопровод. Перечень данных, заносимый в журналы различных подразделений, может отличаться. Объем записываемой о повреждении информации, большой, но не систематизированный. Чаще всего информация включает в себя конкретный участок, ограниченный тепловыми колодцами, тип поврежденного трубопровода (подающий или обратный), а также давление и температуру в подающем и в обратном трубопроводах на момент фиксации повреждения. Сводные данные накапливаются в централь-

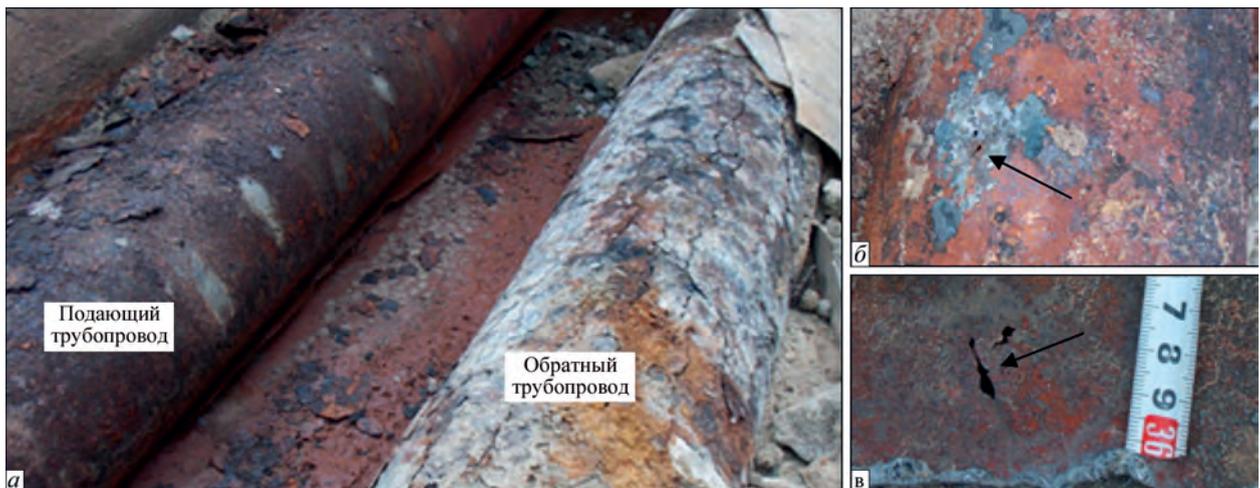


Рис. 1. Участок трубопровода 325×8, сталь 10, непроходная канальная прокладка: а – трубы в канале; б – наружная поверхность подающего трубопровода; в – внутренняя (сквозное коррозионное повреждение отмечено стрелочкой)

ном офисе. Общая отчетность ведется по годам с разбивкой по месяцам. Информация о типе трубопроводов (подающие или обратные), на которых фиксировались повреждения, сохраняется, как правило, в бумажном виде в подразделениях, поэтому отследить динамику повреждаемости отдельно по подающим и по обратным трубопроводам и выявить различия при отсутствии современной базы данных и больших трудозатрат, сложно, и, по сути, делает невозможным проведение оперативного анализа.

Учитывая большой объем имеющейся, но не систематизированной информации, для более детального изучения трубопроводов и их повреждаемости было сформировано две выборки. Выборка 1 – из всех имеющихся тепловых сетей было выбрано несколько, общей длиной (по длине подающего трубопровода) 62,3 км, что составляет всего около 3 % общей протяженности. Анализ результатов выборки был нацелен на то, чтобы представить всю тепловую сеть города, без сетей ГВС. Выборка 2 – составлена из локальных трубопроводов тепловых сетей (от колодца до колодца) и охватывает трубы наибольшего количества имеющихся диаметров. Общая длина локальных трубопроводов выборки 2 составляет 20,47 км, или около 1 % общей протяженности. Выборка была составлена для того, чтобы проанализировать данные по подающим и обратным трубопроводам дифференцированно, но также без сетей ГВС.

На рис. 2 приведена динамика изменения общей повреждаемости тепловых сетей включая магистральные, распределительные и ГВС сети. Общая повреждаемость включает повреждаемость как при эксплуатации, так и при ГИ. Изменение поврежденности магистральных и распределительных сетей, при эксплуатации и при ГИ приведено на рис. 3.

Из рис. 2 можно проследить существенный рост повреждаемости магистральных трубопроводов в 2013 и 2014 гг., что объясняется увеличением протяженности этих сетей в 2013 г. за счет присоединения части распределительных (около 158,7 км), а в 2014 г. – ведомственных сетей (приблизительно 127,6 км) к магистральным. Незна-

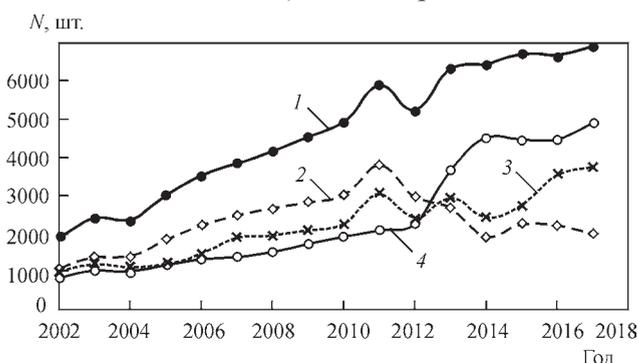


Рис. 2. Изменение общей поврежденности тепловых сетей (N) за период 2002–2017 гг.: 1 – $M+P$; 2 – P ; 3 – ГВС; 4 – M

чительное падение повреждаемости распределительных сетей в 2013 г. можно объяснить за счет передачи части сетей под магистральные.

Данные рис. 3 свидетельствуют о том, что повреждаемость магистральных и распределительных сетей при ГИ со временем растет, но очень незначительно по сравнению с повреждаемостью при эксплуатации. Также из рис. 3 можно видеть, что тенденция развития повреждений распределительных сетей как при эксплуатации, так и при ГИ одинакова. У магистральных сетей эта особенность четко не выражена. Если на рис. 2 и 3 количество повреждений относить к фактической длине сетей, то форма кривых существенно не меняется – спрямления не происходит.

На рис. 4 приведена доля повреждений в период проведения ГИ от общего количества повреждений за 2002–2017 гг. Условно ее можно назвать коэффициентом эффективности проведения ГИ. Если повреждения происходят только при ГИ, то он равен единице. Естественно если повреждения в силу тех или иных причин неизбежно, то лучше чтобы оно произошло во время проведения ГИ – в этом и заключается смысл этих мероприятий. Если же повреждения происходят как при ГИ, так и при эксплуатации, то этот коэффициент характеризует эффективность проведения ГИ. Поэтому, для эффективной с точки зрения проведения ГИ системы, этот коэффициент должен стремиться к единице. Из рис. 4 следует, что он значительно ниже единицы, и имеет четкую тенденцию, по крайней мере, до 2013 г., к снижению. В статье [20] эта доля повреждений указана в процентах, ($\times 100\%$). Там же указано, что для некоторых больших городов РФ этот процент имеет тенденцию к снижению, но при этом находится выше 50 %. Согласно [21], для 8000 км московских теплосетей в двухтрубном исполнении, общее количество повреждений за 2012–2016 гг. колеблется в районе 4000, но имеет тенденцию к росту. При этом коэффициент эффективности

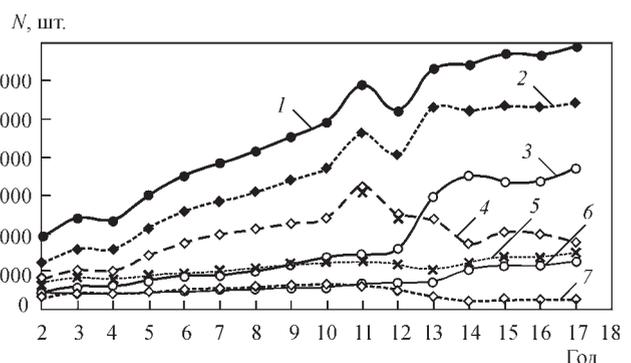


Рис. 3. Изменение поврежденности магистральных и распределительных сетей (N), при эксплуатации и при ГИ за период 2002–2017 гг.: 1 – $M+P$; 2 – M_3+P_3 ; 3 – M_3 ; 4 – P_3 ; 5 – M_1+P_1 ; 6 – M_1 ; 7 – P_1 (индексами э и г обозначены эксплуатация и ГИ, соответственно)

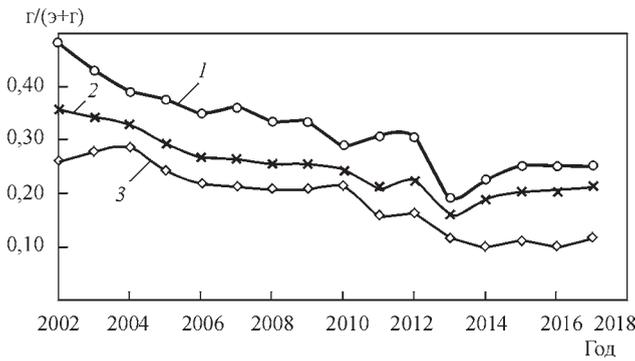


Рис. 4. Доля поврежденных в период проведения ГИ в общем количестве поврежденных за период 2002–2017 гг.: 1 – М; 2 – М+Р; 3 – Р

проведения ГИ составляет 0,87...0,92. Например, в г. Риге, для 656 км теплосетей в двухтрубном исполнении, принадлежащих АО «Ригас Силтумс», за период 2002–2007 гг. было обнаружено в среднем 187 повреждений за год. Приблизительно 90 % всех повреждений относятся к распределительным сетям [22].

На рис. 5 приведены типичные для 2009–2016 гг., распределения повреждаемости по месяцам для распределительных и магистральных сетей на примере 2012 г. Понятно, что сумма повреждаемости по месяцам равна годовой повреждаемости. То есть, площадь под кривой повреждаемости по месяцам равна повреждаемости за год.

Из рис. 5, а можно проследить, что в январе, феврале и марте эксплуатационная повреждаемость распределительных сетей находится примерно на одном уровне. Далее, в период проведения ГИ она снижается в силу того, что часть сетей переходит из режима эксплуатации в режим ГИ. Затем с началом отопительного сезона, в октябре, происходит резкий рост повреждаемости. В ноябре, декабре происходит снижение, и в начале следующего года она снова стабилизируется. Эти закономерности характерны и для рассмотренных 2009–2016 гг. Рост повреждаемости с началом отопительного сезона, по всей вероятности, связан с тем, что во время ГИ часть порывов просто не удается заметить. Например, образование небольших сквозных дефектов, через которые не успевает выйти достаточно воды за время поддержания пробного давления. Наличие небольших сквозных дефектов может всего лишь незначительно сказываться на подпитке, оставляя ее в допустимых пределах.

Как известно из теории тонкостенных оболочек, кольцевые напряжения, а также интенсивность напряжений, пропорциональны отношению радиуса срединной поверхности (r) к толщине стенки (s). Поэтому чем больше этот показатель, тем выше напряжения при одном и том же давлении. Из рис. 6, б, который построенный по данным выборки 1, можно проследить, что чем больше внешний диаметр трубопровода, тем выше в

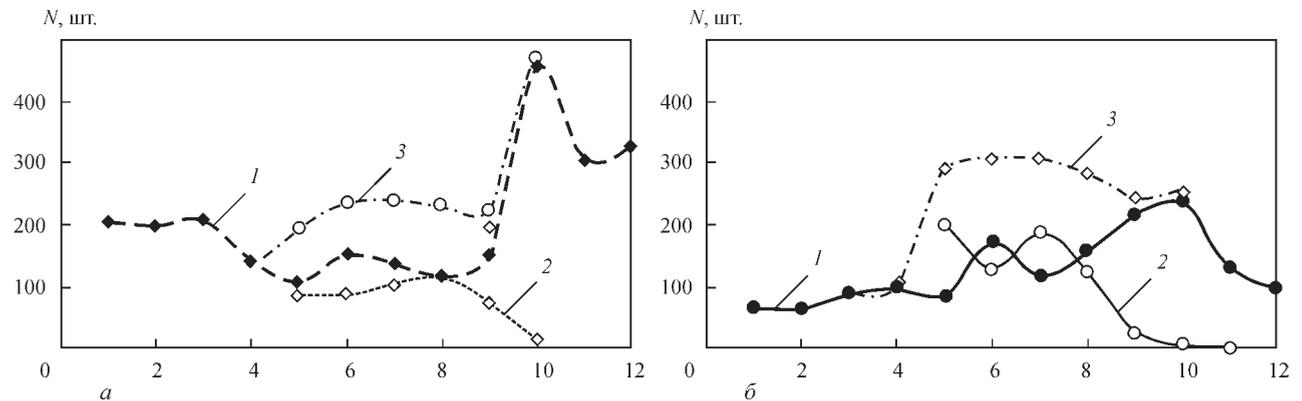


Рис. 5. Типичное распределение повреждаемости по месяцам для распределительных (а: 1 – Р₃; 2 – Р₁; 3 – Р = Р₃ + Р₁) и магистральных (б: 1 – М₃; 2 – М₁; 3 – М = М₃ + М₁) сетей на примере 2012 г.

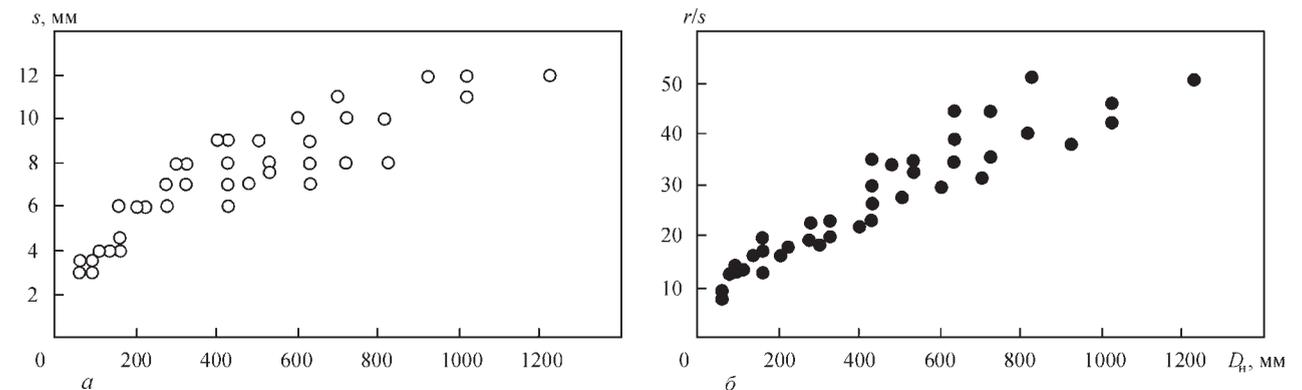


Рис. 6. Некоторые зависимости для трубопроводов выборки 1: а – взаимосвязь толщины стенки (s) с наружным диаметром (D_n); б – зависимость отношения радиуса срединной поверхности (r) к толщине стенки от наружного диаметра

нем напряжения при одинаковом давлении. С увеличением внешнего диаметра, толщина стенки также увеличивается (см. рис. 6, а).

При обработке данных выборки 1 установлено, что большую часть составляют трубопроводы меньшего диаметра. Но нужно учитывать тот факт, что при повреждении трубопровода большого диаметра последствия более серьезные.

При обработке данных выборки 2, взятых за 2013–2017 гг., было установлено количество повреждений как прямых, так и обратных трубопроводов. При ГИ оно составило 26 и 11, а при эксплуатации 47 и 24, соответственно. Отсюда следует, что повреждаемость подающих трубопроводов выше, чем обратных, в среднем в 2,4 раза при ГИ, и в 2 раза при эксплуатации. При анализе выборки 2 можно проследить тенденцию к росту повреждаемости со временем, и то, что трубопроводы меньшего диаметра повреждаются чаще.

Выводы

1. Несмотря на негативные последствия, гидравлические испытания трубопроводов тепловых сетей являются основным методом их технического диагностирования, позволяющим выявить подкритические дефекты.

2. Проведение гидравлических испытаний неоднозначно влияет на повреждаемость трубопроводов – с одной стороны позволяют выявить имеющиеся дефекты и создать определенный «запас прочности» на период эксплуатации до следующего испытания, с другой стороны – пластически деформируют металл в зонах утонения стенки, что приводит к росту скорости коррозии и повышают вероятность образования сквозных дефектов.

3. На основании литературных данных и результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что после длительной эксплуатации, в режиме постепенного накопления пластических деформаций, подающий трубопровод более склонен к коррозионному разрушению, чем обратный.

4. Анализ данных по повреждаемости в г. Киеве за 2002–2017 гг. свидетельствует о том, что доля повреждений при гидравлических испытаниях по сравнению с повреждениями при эксплуатации уменьшается, что на фоне роста общей повреждаемости, свидетельствует о существенной изношенности трубопроводов которая опережает темпы осуществляемой реновации. Повреждаемость подающих трубопроводов как при гидравлических испытаниях, так и при эксплуатации, выше, чем обратных.

5. Полученные результаты могут послужить основой для разработки новых или пересмотра существующих нормативных документов, направленных на совершенствование существующего порядка назначения пробного давления и пересмотра порядка проведения гидравлических испытаний.

6. Несмотря на многочисленные исследования, задача установления оптимального давления гидравлических испытаний трубопроводов тепловых сетей в зависимости от их состояния и условий эксплуатации остается в настоящее время актуальной.

7. В рамках имеющейся геоинформационной системы теплосетей необходимо разработать унифицированный протокол фиксации и описания повреждений в виде реляционной базы данных расчетно-аналитического модуля риск-анализа повреждений.

Авторский коллектив выражает благодарность заведующей отделом ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины Ныркової Л.І. за участие в проведении исследований и обсуждении полученных результатов.

Список литературы

- (2018) «Визначення впливу підвищеного тиску на властивості металу трубопроводів теплових мереж під час проведення гідрравлічних випробувань з наданням рекомендацій щодо величини рівнів пробного тиску у залежності від умов експлуатації». Технічний звіт. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ.
- (2007) *Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж*. Затв. 14.02.2007, № 71. Міністерство палива та енергетики України. Харків, Індустрія.
- (2003) ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила». Затв. 13.06.2003, № 296. Київ, Міністерство палива та енергетики України.
- (2017) Інструкція № 29 *Проведення випробувань теплових мереж на гідрравлічну щільність*. Київ, ПАТ «Київенерго», СВІП «Київські теплові мережі».
- (1997) ГКД 34.20.504-94 «Теплові мережі. Інструкція експлуатації». Київ, НДІ Енергетики.
- (2003) *Методические рекомендации по техническому освидетельствованию трубопроводов тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения «Роскоммунэнерго»*.
- Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Филиппов Г.А. (2008) Факторы снижающие конструктивную прочность металла труб и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей. 3-я научно-практическая конференция «Тепловые сети. Современные практические решения».
- Скоробогатых В.Н., Попов А.Б., Жарикова О.Н. и др. (2008) Определение оптимальных параметров гидравлических испытаний тепловых сетей. *Новости теплоснабжения*, 7(95), 38–43.
- Матвеев В.И., Алибеков С.Я. (2007) Определение состояния металла трубопроводов тепловых сетей по результатам обследования индикаторов коррозии и инженерной диагностики. *Там же*, 12 (88), 34–39.
- Би Вэнцзюнь (2004) *Повышение ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений нефтегазопроводов*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфимский государственный нефтяной технический университет.
- Ковенский М.Д. (2008) Влияние усталостного нагружения в малоциклового области на структуру и свойства трубных сталей. *Известия вузов. Машиностроение*, 3, 41–46.
- (2004) СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети». Москва.
- Kirkwood M., Cosham A. (2000) Can the Pre-service Hydrotest be Eliminated? *Pipes & Pipelines International*, 45, 4.
- Чичерин С.В. (2017) Новый алгоритм анализа величин давления при проведении ежегодных гидравлических испытаний трубопроводов тепловых сетей на плотность и прочность. *Вестник ИрГТУ*, 21, 1, 178–185.
- Пашков Ю.И. (1996) *Трещиностойкость сварных труб для газопроводов*: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва.
- Плешивцев В.Г., Филиппов Г.А., Пак Ю.А., Ливанова О.В. (2009) Влияние содержания углерода и напряженного состояния на скорость коррозии трубной стали в тепловых сетях. *Металлург*, 8, 62–64.
- Гофман Ю.М., Волохов А.В., Григорьев Ю.Ф., Шмельков А.В. (2017) Методика технического диагностирования трубопроводов тепловых сетей при проведении экс-

- пертизы промышленной безопасности. *Электрические станции*, **3**, 16–20.
18. Ионин А.А., Фридман Я.Х. (2001) Обоснование уровня давления при летних гидравлических испытаниях теплопроводов. *Новости теплоснабжения*, **6(10)**, 22–27.
 19. Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Глухих М.В. и др. (2008) Дифференцированная система проведения гидравлических испытаний магистральных тепловых сетей. *Тепловые сети. Современные практические решения: Труды Третьей научно-практической конференции*. Москва, Новости теплоснабжения.
 20. Москалев И.Л., Литвак В.В. (2015) Повреждаемость основных узлов систем теплоснабжения городов. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*, **326**, **7**, 70–80.
 21. АО «МОСГАЗ» (2018) *Актуализация Схемы теплоснабжения города Москвы на период до 2032 г.* Т. 1, Книга 1.6. Надежность теплоснабжения. Описание существующих технических и технологических проблем в системах теплоснабжения.
 22. Дубсон М.И. (2008) Опыт эксплуатации тепловых сетей и индивидуальных тепловых пунктов предприятия «Ригас Силтумс». *Новости Теплоснабжения*, **4(92)**, 14–20.

References

1. (2018) *Determination of higher pressure effect on properties of pipeline metal of heating systems during hydrotesting with recommendations on test pressure level depending on service conditions. Technical report*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
2. (2007) *Operating instructions of heating installations and systems*. Approv. 14.02.2007, No. 71. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Kharkiv, Industriya [in Ukrainian].
3. (2003) GKD 34.20.507-2004: *Technical maintenance of electric power stations and systems*. Rules. Approv. 13.06.2003, No. 296. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukrainian].
4. (2017) *Instruction No. 29: Conducting of testing of heating systems on hydraulic tightness*. Kyiv, PAT Kyivenergo, SVP Kyivski Teplovi Merezhi [in Ukrainian].
5. (1997) GKD 34.20.504-94: *Heating systems. Operating instruction*. Kyiv, Institute of Energy [in Ukrainian].
6. (2003) *Procedural recommendations on technical examination of pipeline in heating systems of public heat supply «Roskommunenergo»* [in Russian].
7. Pleshivtsev, V.G., Pak, Yu.A., Filippov, G.A. Factors lowering the structural strength of pipe metal and prospects for development of new pipe steels for heating systems. In: *Proc. 3rd Sci.-Pract. Conf. on Heating Systems. Modern Practical Solutions* [in Russian].
8. Skorobogatykh, V.N., Popov, A.B., Zharikova, O.N., et al. (2008) Determination of optimum parameters of hydrotesting of heating systems. *Novosti Teplosnabzheniya*, **7(85)**, 38–43 [in Russian].
9. Matveev, V.I., Alibekov, S.Ya. (2007) Determination of the state of pipeline metal in heating systems by the results of examination of corrosion indicators and engineering diagnostics. *Ibid.*, **12(88)**, 34–39 [in Russian].
10. Bi Wengun (2004) *Extension of safe operating life of welded joints in oil and gas pipelines*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Ufa, SPTU [in Russian].
11. Kovensky, M.D. (2008) Impact of low cycle fatigue loading on the structure and properties of pipe steels. *Izv. Vuzov, Mashinostroenie*, **3**, 41–46 [in Russian].
12. (2004) SNiP 41-02-2003 : *Heating systems*. Moscow [in Russian].
13. Kirkwood, M., Coshman, A. (2000) Can the pre-service hydrotest be eliminated? *Pipes & Pipelines Intern.*, **45**, 4.
14. Chicherin, S.V. (2017) New algorithm for analysis of pressure levels when conducting the annual hydrotesting of pipelines in heating systems for tightness and strength. *Vestnik IrGTU*, **21(1)**, 178–185 [in Russian].
15. Pashkov, Yu.I. (1996) *Cracking resistance of welded pipes for gas pipelines*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Moscow [in Russian].
16. Pleshivtsev, V.G., Filippov, G.A., Pak, Yu.A., Livanova, O.V. (2009) Impact of carbon content and stressed state on corrosion rate of pipe steel in heating systems. *Metallurg*, **8**, 62–64 [in Russian].
17. Gofman, Yu.M., Volokhov, A.V., Grigoriev, Yu.F., Shmelkov, A.V. (2017) Procedure of technical diagnostics of heating system pipelines when conducting the examination for industrial safety. *Elektricheskie Stantsii*, **3**, 16–20 [in Russian].
18. Ionin, A.A., Fridman, Ya.Kh. (2001) Substantiation of the level of pressure during summer hydrotesting of heating conduits. *Novosti Teplosnabzheniya*, **6(10)**, 22–27 [in Russian].
19. Pleshivtsev, V.G., Pak, Yu.A., Glukhikh, M.V. et al. (2008) Differentiated system of conducting hydrotesting of the main heating systems. *Heating systems. Modern practical solutions*. In: *Proc. of 3rd Sci.-Pract. Conf.* Moscow, Novosti Teplosnabzheniya
20. Moskalev, I.L., Litvak, V.V. (2015) Damageability of the main components of heat supply systems in cities. *Izv. TPU. Engineering Georesursov*, **326(7)**, 70–80 [in Ukrainian].
21. JSC MOSGAZ (2018) *Actualization of the scheme of heat supply of Moscow city for the period of up to 2032*. Vol. 1, Book 1.6: Reliability of heat supply. Description of the currently available engineering and technological problems in heat supply systems.
22. Dubson, M.I. (2008) Experience of operation of heating systems and individual heating units of Rigas Siltums Enterprise. *Novosti Teplosnabzheniya*, **4(92)**, 14–20 [in Russian].

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ МІСТА КИЄВА

Р.І. Дмитрієнко¹, П.С. Юхимець¹, В.М. Тороп¹, І.М. Кисіль¹, В.М. Єгоренко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²КП «Київтеплоенерго». 01001, м. Київ, пл. І. Франка, 5. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

Проаналізовано фактори, що впливають на пошкоджуваність теплових мереж. Представлено аналіз фактичної пошкоджуваності теплових мереж в останні роки на прикладі міста Києва. Проведено оцінку ефективності сезонних гідрравлічних випробувань. Бібліогр. 22, рис. 6.

Ключові слова: теплові мережі, пориви, пошкоджуваність, гідрравлічні випробування, корозія, дефекти, пробний тиск

DAMAGEABILITY AND EFFECTIVENESS OF CONDUCTING HYDRAULIC TESTING OF HEATING SYSTEMS OF KIEV CITY

R.I. Dmytrienko¹, P.S. Yukhymets¹, V.M. Torop¹, I.N. Kysil¹, V.N. Yehorenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

²UC «Kievteploenergo». 5 I.Franka Sq., 01001, Kyiv, Ukraine. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

Factors affecting the damageability of heating systems have been analyzed. Analysis of actual damageability of heating systems over the recent years is presented in the case of Kiev city. Evaluation of the effectiveness of the conducted seasonal hydraulic testing was performed. 22 Ref., 6 Fig.

Keywords: heating systems, tears, damageability, hydraulic testing, corrosion, defects, test pressure

Поступила в редакцію 13.11.2019