

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>

УДК 620.98: 658.264

Анализ фактического состояния предызолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации

В. А. Седнин¹⁾, А. В. Седнин¹⁾, А. И. Бондарович¹⁾, И. А. Некало¹⁾, А. Д. Мухин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье рассматриваются вопросы, связанные с фактическим состоянием предызолированных (ПИ) трубопроводов систем централизованного теплоснабжения (СЦТ). Часть из находящихся в эксплуатации трубопроводов подходит к расчетному сроку службы, поэтому актуальным является вопрос их дальнейшего использования. Старение трубопроводов СЦТ происходит вследствие различных процессов, связанных как с температурными режимами работы, так и с окислением кислородом. Долговечность полимерных материалов ПИ-труб можно оценить с помощью эмпирического или прогнозного способа. Для шести партий ПИ-труб, находившихся разное время в эксплуатации в СЦТ г. Минска, были проведены испытания по нормируемым параметрам с целью определения их фактических значений. Для большинства представленных образцов величины среднего размера ячеек, плотности термоизоляции, напряжения при деформации сжатия и количества закрытых пор в значительной мере соответствуют требованиям СТБ 2252–2012 для новых труб. Значение коэффициента теплопроводности находится в пределах 0,030–0,037 Вт/(м·К), что на 10 % выше требуемого показателя для новых труб. Значения предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг во многих испытаниях составили меньше 0,12 МПа, что говорит о потенциально возможном разрушении теплоизоляционной конструкции трубы. При этом отсутствует определенная зависимость как от срока эксплуатации труб, так и от температурного режима.

Ключевые слова: теплоснабжение, предызолированные трубы, пенополиуретан, срок службы, старение, предел прочности на сдвиг

Для цитирования: Анализ фактического состояния предызолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации / В. А. Седнин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>

Адрес для переписки

Седнин Алексей Владимирович
Белорусский национальный
технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 397-36-20
Sednin@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Alexei V.
Belarusian National
Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 397-36-20
Sednin@bntu.by

Analysis of the Actual Condition of Pre-Insulated Pipelines of District Heating Systems After Operation

V. A. Sednin¹⁾, A. V. Sednin¹⁾, A. I. Bondarovich¹⁾, I. A. Nekalo¹⁾, A. D. Mukhin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses issues related to the actual condition of pre-insulated (PI) pipelines of district heating systems (DHS). Some of the pipelines in operation are approaching their estimated service life, so the issue of their further use is relevant. The aging of the heating supply pipelines occurs due to various processes associated with both operating temperature regimes and oxidation. The durability of polymer materials used in pre-insulated pipes can be assessed through empirical or predictive methods. For six batches of PI pipes that were in operation at different times in the Minsk DHS, tests were carried out according to standardized parameters in order to determine their actual values. For most of the samples presented, the values of the average cell size, thermal insulation density, compression strain stress and the number of closed pores significantly meet the requirements of STB 2252–2012 for new pipes. The value of the thermal conductivity coefficient is in the range of 0.030 to 0.037 W/(m·K), which is 10 % higher than the required value for new pipes. Values of the shear strength limit of the pre-insulated pipe construction in many tests was less than 0.12 MPa, indicating a potential risk of failure in the thermal insulation structure of the pipe. Besides, there is no specific correlation with either the service life of the pipes or the temperature regime.

Keywords: district heating system, pre-insulated pipes, polyurethane foam, service life, degradation, axial shear strength

For citation: Sednin V. A., Sednin A. V., Bondarovich A. I., Nekalo I. N., Mukhin A. D. (2024) Analysis of the Actual Condition of Pre-Insulated Pipelines of District Heating Systems After Operation. *Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>

Введение

В большинстве стран СНГ, а также в ряде стран Северной и Центральной Европы теплоснабжение крупных городов обеспечивается системами централизованного теплоснабжения (ЦТ). В настоящее время системы теплоснабжения находятся в состоянии трансформации и перехода к качественно новым условиям функционирования, особенно в странах Западной Европы [1], а также рассматриваются в качестве основного элемента энергетических систем будущего [2]. Системы теплоснабжения включают в себя источники тепловой энергии, системы ее транспорта и тепловых потребителей. Системы транспорта тепловой энергии имеют критическое значение для надежной и эффективной работы ЦТ [3]. В настоящее время в ЦТ применяются в основном предизолированные (ПИ) трубопроводы, состоящие из трех основных элементов: стальной трубы, пенополиуретанового (ППУ) изоляционного слоя и полиэтиленовой оболочки [4, 5]. Часть из находящихся в эксплуатации трубопроводов подходит к расчетному сроку службы в соответствии с требованиями нормативных документов [6, 7], поэтому актуальным является вопрос их дальнейшей

эксплуатации. Старение трубопроводов СЦТ происходит вследствие различных процессов, связанных как с температурными режимами работы, так и с окислением кислородом. При этом используемые методы для прогнозирования расчетного срока эксплуатации трубопроводов дают различные результаты [8]. Важной особенностью ПИ-труб подземной бесканальной прокладки является то, что три материала (сталь, полиуретан и полиэтиленовая оболочка) образуют композитную систему, воспринимающую нагрузки, возникающие при тепловом расширении материала несущей трубы (стали). Для нормальной работы трубопровода необходимо, чтобы сила теплового расширения от стальной трубы передавалась через слой пенополиуретана на оболочку, при этом скольжение должно происходить на границе оболочки и грунта. В случае недостаточной прочности нарушается целостность конструкции, что вызывает неправильную работу компенсаторов, приводит к разрушению изоляции, намоканию обширных участков ППУ изоляции и коррозионному разрушению трубопровода.

Срок службы трубопроводной системы зависит от качества изготовления труб, выполнения работ по строительству трубопровода, эксплуатационных нагрузок и других местных граничных условий [9].

В Республике Беларусь предварительно изолированные трубы (рис. 1) производятся в соответствии с СТБ 2251–2012, СТБ 2252–2012, СТБ 2270–2012. По состоянию на 01.01.2023, протяженность ПИ-труб, находящихся на балансе РУП «Минскэнерго», составляла 1190,394 км. Данные [10] о времени эксплуатации и диаметрах магистральных и квартальных теплосетей, выполненных из ПИ-труб, РУП «Минскэнерго» представлены на рис. 2.

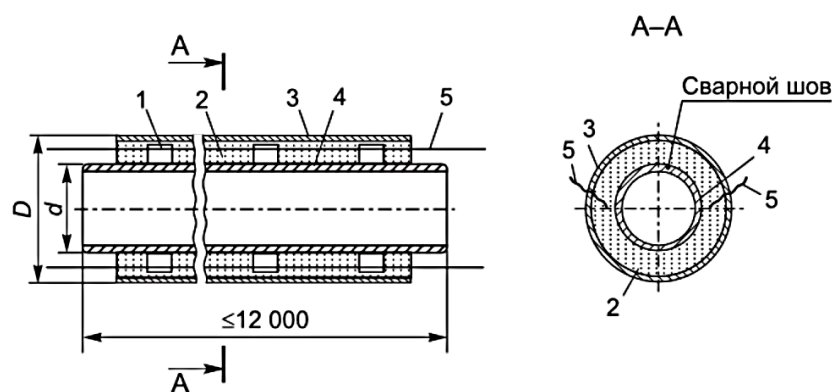


Рис. 1. Конструкция предизолированной трубы:

- 1 – центрирующая опора; 2 – пенополиуретановая термоизоляция; 3 – труба-оболочка из полиэтилена; 4 – стальная труба; 5 – проводники системы оперативного дистанционного контроля (условное изображение)

Fig. 1. The design of the pre-insulated pipe: 1 – centering support; 2 – polyurethane foam thermal insulation; 3 – polyethylene shell pipe; 4 – steel pipe; 5 – conductors of the operational remote control system (conditional image)

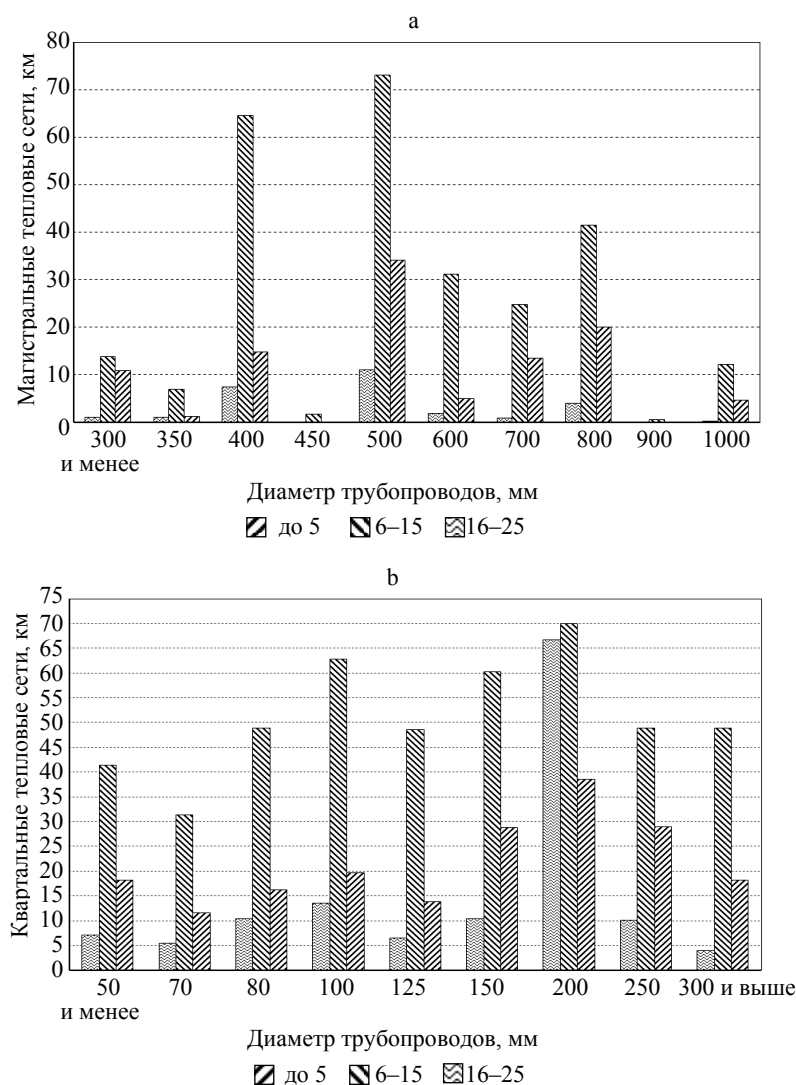


Рис. 2. Протяженность магистральных (а) и квартальных (б) предизолированных трубопроводов, находящихся на балансе РУП «Минскэнерго»

Fig. 2. The length of the main (a) and quarter (b) pre-insulated pipelines on the balance sheet of RUE Minskenergo

Методы определения расчетного срока службы предизолированных труб

Долговечность полимерных материалов ПИ-труб можно оценить с помощью двух различных подходов: первого – эмпирического, основанного на оценке характеристик естественно состарившихся материалов и дальнейшей их математической обработке; второго – прогнозного, основанного на экспериментальных данных испытаний на ускоренное старение и математической оценке влияния зависимых и независимых переменных [11].

Согласно белорусскому и европейскому стандартам на изготовление ПИ-труб, оценку их технических характеристик проводят после выполнения искусственного старения пенополиуретана [6, 7]. Для проведения процесса старения термоизоляции из пенополиуретана по стальной трубе в течение 3600 ч (1450 ч) должна циркулировать жидкость ПЭС-4 с температурой 160 °С (170 °С) [11], после чего труба должна выдержать испытание на аксиальный сдвиг с предельным значением 0,12 МПа. Согласно [6], срок службы ПИ-труб централизованного теплоснабжения должен быть не менее 30 лет при условии непрерывной эксплуатации с максимальной температурой, не превышающей 120 °С.

Во многих исследованиях при проведении искусственного старения путем выдержки трубы при относительно высоких температурах оценивают прочность конструкции ПИ-трубы на сдвиг при разных значениях температуры и времени выдержки. Полученные таким образом результаты экстраполируют к средней расчетной температуре, при которой эксплуатируется трубопровод и оценивается прогнозный срок службы трубопровода [13].

Однако, как показывает практика, результаты, полученные таким способом, не дают полностью достоверной информации о том, как изменяются компоненты труб централизованного теплоснабжения с течением времени при их эксплуатации в рабочих условиях, что затрудняет прогнозирование реального срока их службы.

Некоторыми авторами были исследованы характеристики трубопроводов с разным сроком службы и сопоставлены результаты искусственного и естественного старения. Так, в [14] исследованы 10 труб, бывших в эксплуатации в системах централизованного теплоснабжения Швеции и Норвегии, с целью изучения влияния естественного старения на механическую адгезию и химическую структуру пенополиуретана. Показано, что в процессе эксплуатации трубопроводов CO₂ постоянно диффундирует из пены и замещается воздухом, что приводит к увеличению теплопроводности не более чем на 30 % [14]. Увеличение теплопроводности не считается достаточным основанием для окончания срока службы труб и их замены.

Результаты испытаний материалов с естественным старением, как правило, являются основной базой для любого подхода к прогнозированию срока службы трубопровода. Стоит отметить, что в настоящее время недостаточно данных, полученных при испытании труб после их эксплуатации. В частности, авторами [15] были исследованы трубы, находившиеся в эксплуатации до 26 лет, но закономерность их старения выявлена не была.

Предыдущие исследования показывают, что деградация полиуретана включает несколько сложных процессов, в том числе термический стресс в сочетании с окислительной деструкцией и проникновением влаги, а также, в меньшей степени, циклические механические нагрузки.

Проведение испытаний образцов предызолированных труб, находившихся в эксплуатации

При проведении испытаний исследовались шесть партий предызолированных трубопроводов, находившихся в эксплуатации в системе теплоснабжения г. Минска (табл. 1). Каждая партия включала в себя образцы труб, трубопроводов как прямой (П), так и обратной (О) сетевой воды. Для измерения теплопроводности были подготовлены по пять образцов пенополиуретана для труб прямой и обратной сетевой воды и по три заготовки для проведения испытаний на сдвиг в осевом направлении (рис. 3).

Таблица 1

Исходные данные по ПИ-трубопроводам, находившимся в эксплуатации
Initial data on pre-insulated pipelines in operation

Номер партии	Трубопровод	Наружный диаметр трубопровода, мм	Год прокладки	Тип прокладки
Партия 1	П1	273	2003	Бесканальная
	О1	273	2003	Бесканальная
Партия 2	П2	325	2012	В канале
	О2	325	2012	В канале
Партия 3	П3	325	2011	Бесканальная
	П3	325	2011	Бесканальная
Партия 4	П4	426	2006	Бесканальная
	О4	426	2006	Бесканальная
Партия 5	П5	530	1999	В футляре
	О5	530	1999	В футляре
Партия 6	П6	630	2011	Бесканальная
	О6	630	2011	Бесканальная



Рис. 3. Образцы труб и пенополиуретана для проведения испытаний

Fig. 3. Samples of pipes and polyurethane foam for testing

Параметры, которые измерялись при испытаниях, и их предельные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные по ПИ-трубопроводам, находившимся в эксплуатации
Initial data on pre-insulated pipelines in operation

Измеряемый параметр	Технические требования согласно [6]
<i>Термоизоляция из жесткого пенополиуретана</i>	
Средний размер ячеек	В радиальном направлении должен быть не более 0,5 мм
Кажущаяся плотность термоизоляции	Не менее 60 кг/м ³
Напряжение при 10%-й деформации сжатия	Не менее 0,3 МПа
Водопоглощение по объему	После кипячения в течение 90 мин в дистиллированной воде должно быть не более 10 %
Количество закрытых пор	Количество закрытых пор в пенополиуретане должно быть не менее 82 %
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Теплопроводность λ жесткого пенополиуретана не должна превышать 0,033 Вт/(м·К)
<i>ПИ-трубы</i>	
Предел прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг в осевом направлении τ , МПа	Минимальное значение предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг составляет 0,12 МПа (температура при испытаниях 23 ± 2 °С)

Как уже было сказано, температурные режимы тепловых сетей оказывают большое влияние на эффективность работы предизолированных труб. На рис. 4 представлены фактические температурные графики на разных объектах СЦТ Минска за период с августа 2023 г. по май 2024 г., полученные в результате реализации программы по созданию цифровой диспетчерской [16]. Как видно, для объектов, подключенных к различным источникам тепловой энергии, профиль температурного графика практически одинаков. Большую часть времени температура прямой сетевой воды не превышает 70–75 °С и только в периоды низких температур наружного воздуха поднимается до 90–95 °С.

Температура обратной сетевой воды характеризуется меньшим диапазоном изменения и практически круглогодично находится в пределах 40–50 °С. На рис. 4е приведен тренд изменения температур прямой и обратной сетевой воды для одного из объектов СЦТ районной котельной «Шабаны», который также подтверждает большую амплитуду изменения температуры прямой сетевой воды.

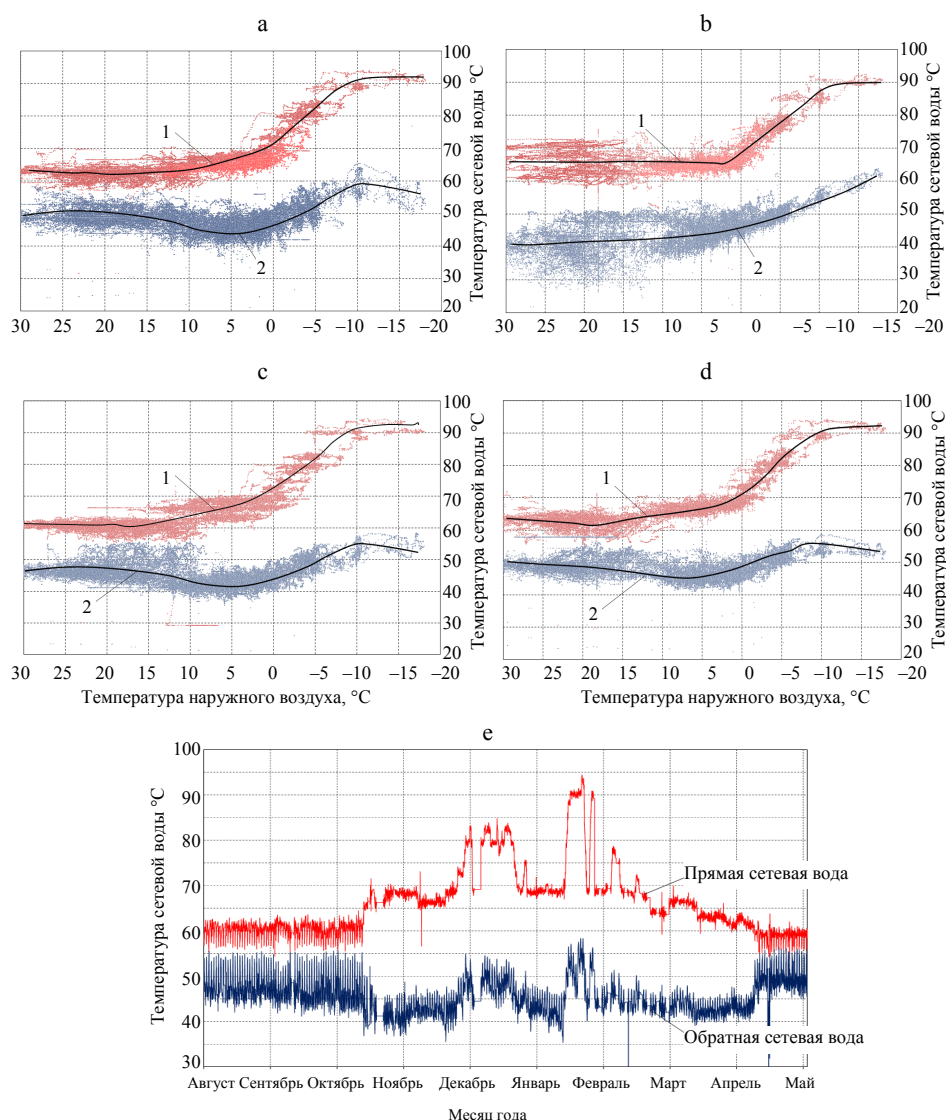


Рис. 4. Фактические температурные режимы СЦТ г. Минска: а – зона Минской ТЭЦ-4;

б – то же Минской ТЭЦ-3; с – то же Минской ТЭЦ-2;

д – то же районной котельной «Шабаны»; е – тренд изменения температур прямой и обратной сетевой воды зоны районной котельной «Шабаны»

Fig. 4. Actual temperature conditions of the Minsk thermal power plant:

a – zone of the Minsk CHP-4; b – the same of Minsk CHP-3; c – the same of Minsk CHP-2;

d – the same of the district boiler house “Shabany”; e – the trend of temperature changes in direct and reverse mains water zone of the district boiler house “Shabany”

Анализ полученных результатов

Результаты измерений основных параметров представлены на рис. 5. Стоит отметить, что для большинства представленных образцов величины среднего размера ячеек, плотности термоизоляции, напряжения при деформации сжатия и количества закрытых пор в значительной мере соответствуют требованиям СТБ 2252–2012. Исключение составляет партия 2,

для которой характерны большие плотность и водопоглощение по объему, что позволяет предположить, что данные трубы эксплуатировались в условиях подтопления. Для этой партии также характерны большие значения коэффициента теплопроводности (рис. 5а, б). Для остальных партий значения коэффициента теплопроводности находятся в пределах 0,030–0,037 Вт/(м·К), что на 10 % выше требуемого показателя для новых труб.

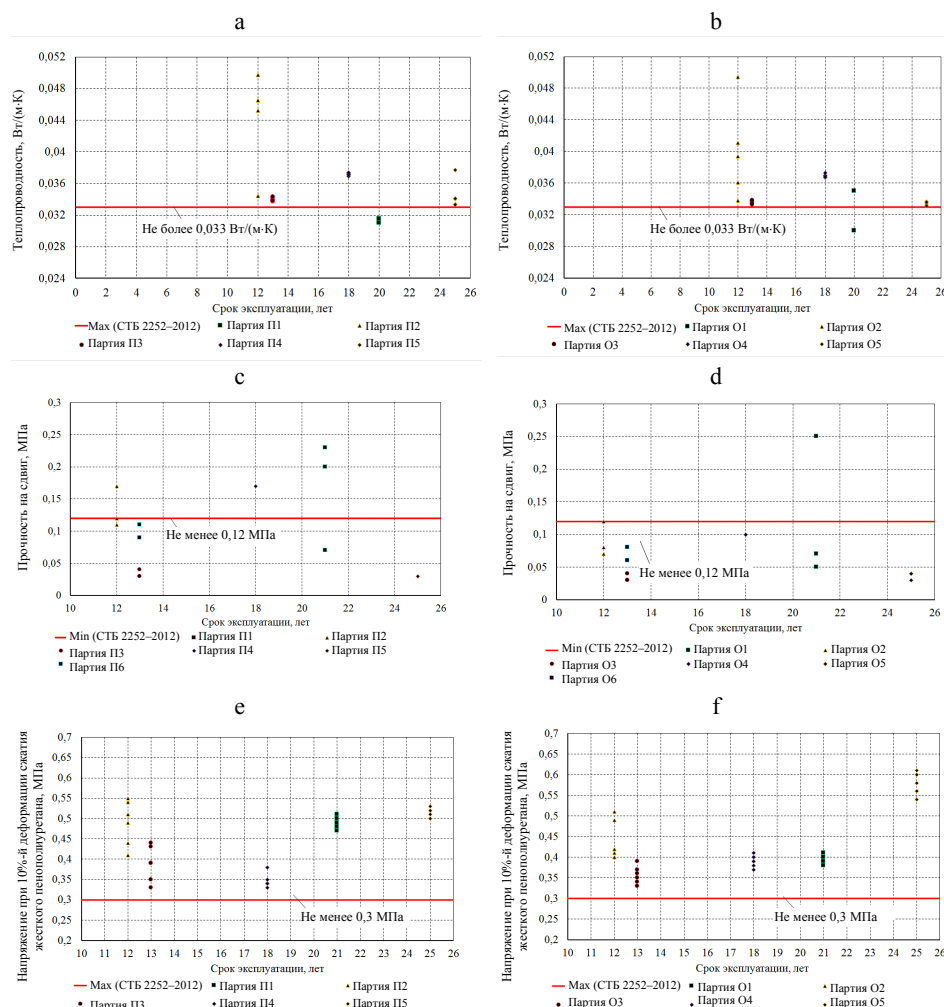
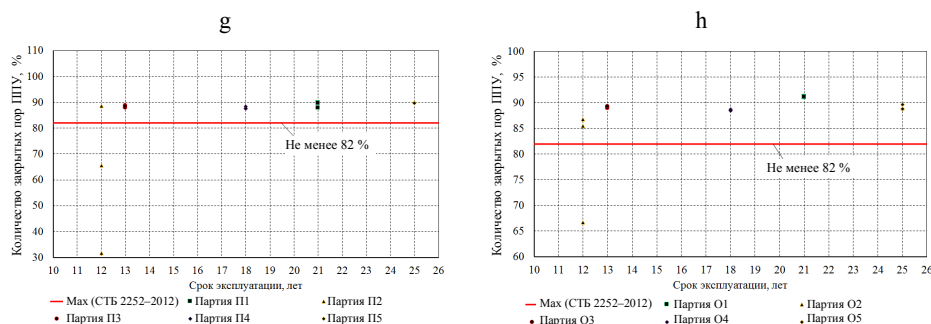


Рис. 5. Результаты испытаний образцов труб согласно СТБ 2252–2012:
а, б – теплопроводность пенополиуретана трубопроводов прямой и обратной сетевой воды; с, d – предел прочности конструкции ПИ-трубопроводов прямой и обратной сетевой воды на сдвиг в осевом направлении; е, f – напряжение при 10%-й деформации сжатия пенополиуретана трубопроводов прямой и обратной сетевой воды; g, h – количество закрытых пор пенополиуретана трубопроводов прямой и обратной сетевой воды (Окончание рис. 5 на с. 553)

Fig. 5. Test results of pipe samples according to STB 2252–2012: а, б – thermal conductivity of polyurethane foam of direct and reverse mains water pipelines; с, d – structural strength of pre-insulated pipelines of direct and reverse mains water for axial displacement; е, f – voltage at 10 % compression deformation of polyurethane foam of direct and reverse mains water pipelines; g, h – the number of closed pores of polyurethane foam of direct and reverse mains water pipelines (Ending of Fig. 5 is on page 553)



Окончание рис. 5

Ending of Fig. 5

Величины предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг во многих испытаниях составили меньше 0,12 МПа. При этом отсутствует однозначная зависимость от срока эксплуатации и температурного режима. На рис. 6а, б приведены значения предела прочности для исследуемых труб и значения, полученные аналогичным способом, для труб, находившихся в эксплуатации в системах теплоснабжения Германии, Норвегии [14] и Южной Кореи [17].

На рис. 6с, d представлены данные о том, в каком месте произошло разрушение конструкции ПИ-трубы: металл–ППУ (рис. 6с), когда сдвиг пенополиуретана (ППУ) произошел относительно металлической трубы, и ПЭ–ППУ (рис. 6d), когда произошел сдвиг полиэтиленовой (ПЭ) оболочки относительно ППУ. Как видно из графика, разрушения ПЭ–ППУ происходят при низких нагрузках и значениях, меньших 0,12 МПа. Примеры фотографий разрушений конструкции представлены на рис. 7.

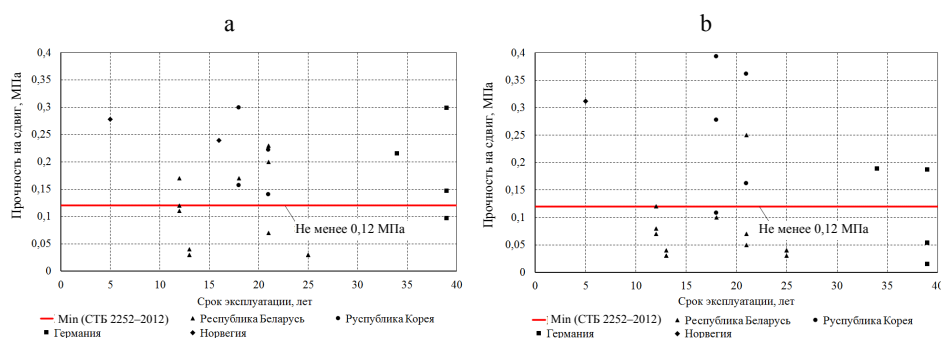
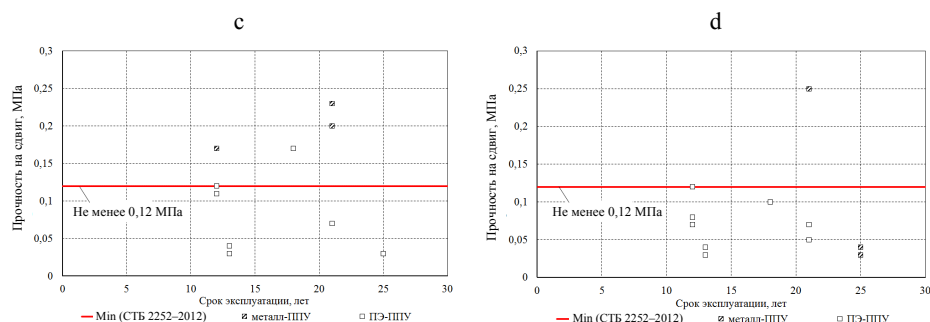


Рис. 6. Зависимость прочности при аксиальном сдвиге от срока эксплуатации трубопровода: а, б – для исследуемых ПИ-трубопроводов и трубопроводов, бывших в эксплуатации, в СЦТ Германии, Норвегии [14], Южной Кореи [17]; с, d – для исследуемых ПИ-трубопроводов с указанием места, где произошло разрушение (Окончание рис. 6 на с. 554)

Fig. 6. Dependence of the strength on the service life of the pipeline during axial shear: а, б – for pre-insulated pipelines under study and pipelines that were in operation in Germany, Norway [14], South Korea [17]; с, d – for the pre-insulated pipelines under study, indicating the location where the destruction occurred (Ending of Fig. 6 is on page 554)



Окончание рис. 6

Ending of Fig. 6

Значения осевого сдвига одинаковы для трубопроводов прямой и обратной сетевой воды, что позволяет говорить о незначительном влиянии фактического температурного режима работы СЦТ. Также сложно выделить зависимость значений осевого сдвига от срока эксплуатации.

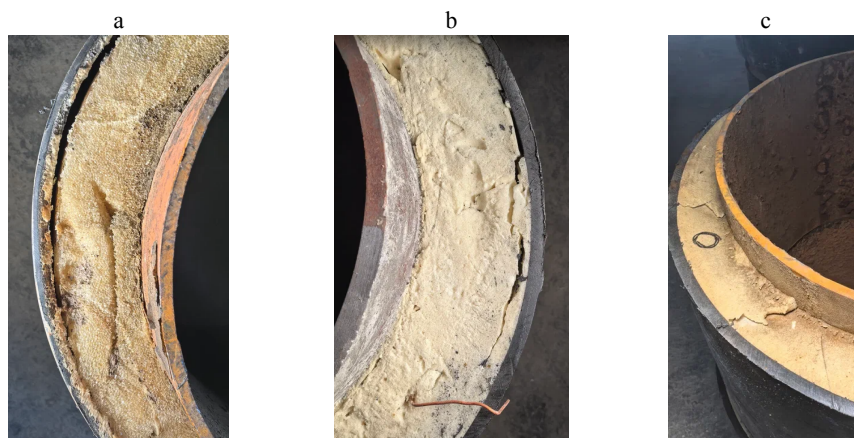


Рис. 7. Результаты разрушений образцов ПИ-труб, бывших в эксплуатации, при аксиальном сдвиге: а, б – ПЭ-ППУ; с – металл-ППУ

Fig. 7. The results of destruction of samples of pre-insulated pipes that were in operation during axial shear: а, б – PE-PUR; с – metal-PUR

ВЫВОДЫ

1. Системы централизованного теплоснабжения являются и будут оставаться одними из важнейших элементов энергосистем будущего. Системы транспорта тепловой энергии определяют надежность и эффективность работы всей системы.

2. Проведенные исследования образцов предизолированных труб, находившихся в эксплуатации разный период времени, показали, что величины среднего размера ячеек, плотности термоизоляции, напряжения при деформации сжатия и количества закрытых пор в значительной мере соот-

ветствуют требованиям СТБ 2252–2012 для новых труб. Значения коэффициента теплопроводности образцов пенополиуретана находятся в пределах 0,030–0,037 (Вт/м·К), за исключением одной партии, для которой характерны большие плотность и водопоглощение по объему, что позволяет предположить длительную эксплуатацию в условиях подтопления. Величины предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг во многих испытаниях составили меньше 0,12 МПа, при которых произошел сдвиг полиэтиленовой оболочки относительно ППУ. При этом отсутствует определенная зависимость как от срока эксплуатации труб, так и от температурного режима.

3. Так как механизм естественного старения ПИ-труб систем централизованного теплоснабжения определяется многими факторами, необходимо продолжить исследования по анализу труб, находившихся в эксплуатации, с учетом их первоначальных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 165. P. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024 Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>.
3. A Brief Overview of District Heating Pipe Network Progress / Safae El Mrabet [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2024 X, Volume 23, 2024, 100641, <https://doi.org/10.1016/j.escm.2024.100641>.
4. Исследование физико-механических свойств лабораторных и промышленных образцов теплоизоляционных материалов, применяемых для производства предизолированных труб, фасонных изделий и скрупок / Л. В. Лучкина [и др.] // *Пластические массы*. 2019. № 11–12. С. 50–55. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-50-55>.
5. Weidlich, I. Reserves in axial Shear Strength of District Heating Pipes / I. Weidlich, M. Illguth, G. Banushi // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 147. P. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.037>.
6. District Heating Pipes. Preinsulated Bonded Pipe Systems for Directly Buried Hot Water Networks. Pipe Assembly of Steel Service Pipe, Polyurethane: EN 253 – 2020. European Committee for Standardization, 2020.
7. Трубы стальные, предварительно термоизолированные пенополиуретаном. Технические условия: СТБ 2252–2012. Взамен СТБ 1295–2001 в части труб стальных, предварительно термоизолированных пенополиуретаном; введ. 01.09.2012. Минск: Госстандарт: Стройтехнорм: Минсктиппроект, 2012. II, 18 с.
8. Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of district heating pipes / S. Hay [et al.] [Electronic Resource] // *The 18th International Symposium on District Heating and Cooling*, September 3–6, 2023, Beijing, China. Mode of access: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/cce6c628-9a50-48a3-b11a-5105fda1e59f/content>.
9. Hay, S. Remaining Service Life of Preinsulated Bonded Pipes—A Key Element of Transformation Strategies and Future District Heating Systems in Germany / S. Hay, A. Leuteritz, M. Morgenthum // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7, No 4, 2021. P. 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.084>.
10. Пантелей, Н. В. Оценка состояния и анализ повреждаемости трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Пантелей // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 179–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-179-188>.

11. Jakubowicz, I. Research, Standardization and Practice in Accelerated Ageing tests / I. Jakubowicz // *Polimery*. 2024. Vol. 49, No 5. Art. 321e326. <https://doi.org/10.14314/polimery.2004.321>.
12. Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating / A. Leuteritz [et al.] // *Polymer Testing*. 2016. Vol. 51. P. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
13. Vega, A. Optimal Conditions for Accelerated Thermal Ageing of District Heating Pipes / A. Vega, N. Yarahmadi, I. Jakubowicz // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 149. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.171>.
14. Vega, A. Determining the Useful Life of District Heating Pipes: Correlation Between Natural and Accelerated Ageing / A. Vega, N. Yarahmadi, I. Jakubowicz // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 175. Art. 109117. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109117>.
15. Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating / A. Leuteritz [et al.] // *Polymer Testing*. 2016. Vol. 51. P. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
16. Седнин, А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения / А. В. Седнин, А. В. Жерело // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
17. Effect of Operating Temperature Conditions in 21-Year-Old Insulated Pipe for a District Heating Network / J. Kim // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 27. Art. 101265. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101265>.

Поступила 19.08.2024 Подписана в печать 23.10.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Lund H., Duic N., Østergaard P. A., Mathiesen B. V. (2018) Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating. *Energy*, 165, 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian).
3. El Mrabet S., Lamrani B., Abd-Lefdil M., Kouksou T. (2024) A Brief Overview of District Heating Pipe Network Progress. *Energy Conversion and Management: X*, 23, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100641>.
4. Luchkina L. V., Nikiforova G. G., Vasiliev V. G., Romanov S. V. (2019) Study of Physical and Mechanical Properties of Laboratory and Industrial Samples of Heat Insulating Materials Used for the Production of Pre-Insulated Pipes, fittings and Polyurethane Shells. *Plasticheskie Massy*, (11–12), 50–55. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-50-55> (in Russian).
5. Weidlich I., Illguth M., Banushi G. (2018) Reserves in Axial Shear Strength of District Heating Pipes. *Energy Procedia*, 147, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.037>.
6. EN 253 – 2020. *District Heating Pipes. Preinsulated Bonded Pipe Systems for Directly Buried Hot Water Networks. Pipe Assembly of Steel Service Pipe, Polyurethane*. European Committee for Standardization, 2020.
7. STB 2252-2012. *Steel Pipes, Previously Insulated with Polyurethane Foam. Technical Conditions*. Minsk, Gosstandart, Stroytehnorm, Minskipproekt, 2012. 18 (in Russian).
8. Status Assessment, Ageing, Lifetime Prediction and Asset Management of District Heating Pipes. The 18th International Symposium on District Heating and Cooling, September 3–6, 2023, Beijing, China.
9. Hay S., Leuteritz A., Morgenthum M. (2021) Remaining Service Life of Preinsulated Bonded Pipes—A Key Element of Transformation Strategies and Future District Heating Systems in Germany. *Energy Reports*, 7, 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.084>.

10. Panteley N. V. (2018) Assessment of the State and Analysis of Damageability of Heating Grids Pipelines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 179–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-179-188> (in Russian).
11. Jakubowicz I. (2004) Research, Standardization and Practice in Accelerated Ageing Tests. *Polimery*, 49 (05), 321–325. <https://doi.org/10.14314/polimery.2004.321>.
12. Leuteritz A., Döring K.-D., Lampke T., Kuehnert I. (2016) Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating. *Polymer Testing*, 51, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
13. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. (2018) Optimal Conditions for Accelerated Thermal Ageing of District Heating Pipes. *Energy Procedia*, 149, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.171>.
14. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. (2020) Determining the Useful Life of District Heating Pipes: Correlation Between Natural and Accelerated Ageing. *Polymer Degradation and Stability*, 175, 109117. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109117>.
15. Leuteritz A., Döring K.-D., Lampke T., Kuehnert I. (2016) Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating. *Polymer Testing*, 51, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
16. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249> (in Russian).
17. Kim J., Kim Y. S., Kim H., Yoon J. (2021) Effect of Operating Temperature Conditions in 21-Year-Old Insulated Pipe for a District Heating Network. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101265. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101265>.