

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 66.045.3

EDN: JFTCLA

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-502-512



Комплексное исследование причин разрушения пенополиуретановой изоляции в системах теплоснабжения

И.М. Газизуллин^{1✉}, А.В. Дмитриев², Г.Д. Русаков³, Г.Р. Бадретдинова⁴

¹⁻⁴Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме. Цель – рассмотреть механизмы образования дефектов пенополиуретановой изоляции, используемой в трубопроводах, в частности, для энергетики и централизованного теплоснабжения. Объектом исследования является пенополиуретановая изоляция, находящаяся между сталью и полиэтиленом. Численный термомеханический анализ был проведен с использованием программного обеспечения ANSYS на П-образном участке трубы с пенополиуретановой изоляцией для моделирования условий эксплуатации при температуре теплоносителя 130 °C с различной температурой окружающей среды от -20 до +20 °C с шагом в 5 °C. Рассмотрены различные причины возникновения дефектов в изоляции, включая технологические факторы при производстве (например, неравномерное нанесение, неправильная температура вспенивания, загрязнение влагой), механические нагрузки (удары, вибрации) и термические напряжения. Описан процесс разрушения пенополиуретана, включающий конденсацию, коррозию и химический распад. В ходе проведенных исследований установлено, что значительные концентрации напряжений возникают в местах поворота труб с пенополиуретановой изоляцией. Показано, что максимальное напряжение фон Мизеса составляет 0,45678 МПа при температуре окружающей среды -20 °C (с разницей температуры теплоносителя и окружающей среды 150 °C). Это близко к пределу прочности пенополиуретана, что при циклических процессах сжатия и расширения может привести к возникновению дефектов с последующей деградацией изоляционного слоя. Таким образом, показано, что термические нагрузки, наряду с дефектами производства и механическими воздействиями, являются основными причинами возникновения дефектов в пенополиуретановой изоляции (таких как трещины, расслоения, усталости), которые нарушают структурную целостность и тепловые характеристики труб с полиуретановой изоляцией.

Ключевые слова: пенополиуретан, термические напряжения, механические волны, ANSYS, диагностика трубопроводов, коэффициент теплового расширения, деформации

Финансирование. Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>. Авторы благодарят РНФ за поддержку настоящих исследований.

Для цитирования: Газизуллин И.М., Дмитриев А.В., Русаков Г.Д., Бадретдинова Г.Р. Комплексное исследование причин разрушения пенополиуретановой изоляции в системах теплоснабжения // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 502–512. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-502-512>. EDN: JFTCLA.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Polyurethane foam insulation: Causes of failure in district heating systems

Il'giz M. Gazizullin^{1✉}, Andrei V. Dmitriev², Grigorii D. Rusakov³,
Guzel R. Badretdinova⁴

¹⁻⁴Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract. This study investigates the mechanisms of defect formation in polyurethane foam (PUF) insulation used in pipelines for energy and central heating applications. The research focuses on PUF insulation placed between a steel pipe and a polyethylene casing. A numerical thermomechanical analysis was performed using ANSYS software on a U-shaped section of an insulated pipe to simulate the operational conditions with a heat-transfer fluid temperature of 130 °C and ambient temperatures varying from -20 °C to +20 °C in 5 °C increments. Various causes of insulation defects were examined, including manufacturing factors (e.g., uneven application, incorrect foaming temperature, and moisture contamination), mechanical loads (impact and vibration), and thermal stress. The PUF failure process, which involves condensation, corrosion, and chemical degradation, is described. The investigation established that significant stress concentrations occur at the bends of pipes

covered with PUF insulation. The maximum von Mises stress was determined to be 0.45678 MPa at an ambient temperature of -20°C with a temperature differential of 150°C between the fluid and environment. This value approaches the ultimate strength of the polyurethane foam, indicating that cyclic compression and expansion processes can initiate defects and lead to subsequent degradation of the insulating layer. Thus, the study demonstrates that thermal loads, along with manufacturing defects and mechanical impacts, are the primary factors in the formation of defects in PUF, such as cracks, delamination, and fatigue, which compromise the structural integrity and thermal performance of insulated pipes.

Keywords: polyurethane foam, thermal stresses, mechanical waves, ANSYS, diagnostics of pipelines, coefficient of thermal expansion, deformations

Funding. This work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation Grant No. 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>. The authors thank the Russian Science Foundation for the support of the study.

For citation: Gazizullin I.M., Dmitriev A.V., Rusakov G.D., Badretdinova G.R. Polyurethane foam insulation: Causes of failure in district heating systems. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):502-512. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-502-512>. EDN: JFTCLA.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизмов формирования и последствий дефектов в трубах с пенополиуретановой (ППУ) изоляцией является одной из ключевых задач в области инженерной безопасности, экологии и энергоэффективности. В энергетике и нефтегазовой отрасли трубопроводы с ППУ изоляцией используются для транспортировки высокотемпературных и высоконапорных сред (рис. 1). Популярность труб с ППУ изоляцией обусловлена хорошими теплоизоляционными свойствами пенополиуретана, его теплопроводность не превышает 0,03 Вт/(м·К).

Это самый низкий показатель среди остальных материалов, применяемых для утепления трубопроводов.

Дефекты в изоляции могут привести к утечкам нефтепродуктов, химических веществ

или тепловой энергии, что негативно влияет на экосистемы. Например, разрывы трубопроводов с нефтью в экологически уязвимых регионах (как Арктика) или в охраняемых природных зонах могут вызывать масштабные аварии. Также повреждения ППУ слоя увеличивают теплопотери, что требует дополнительного потребления энергоресурсов.

Средние ежегодные потери от теплопотерь в трубопроводах с дефектами в России⁶ оцениваются в 10–15% при норме в 5–7% [1]. Дефекты, такие как пустоты и трещины, создают области с повышенной теплопроводностью, так как воздух внутри пустот обладает более высокой теплопроводностью, чем ППУ [2].

Процесс разрушения труб с ППУ изоляцией можно описать следующим образом. Когда температура внешней поверхности



Рис. 1. Наиболее распространенные теплоизолированные трубы с пенополиуретановой изоляцией⁵
Fig. 1. The most common thermally insulated pipes with polyurethane foam insulation⁵

⁵Gutierrez L.D. A Circular economy approach to multifunctional sandwich structures: polymeric foams for district heating pre-insulated pipes: thesis. Hamburg: HafenCity Universität Hamburg, 2022. 218 p. <https://doi.org/10.34712/142.35>

⁶Кузник И.В. Российское теплоснабжение. Учет и эксплуатация: эссе. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2006. 190 с.

металлической трубы падает ниже точки росы окружающей среды, начинается процесс конденсации водяного пара. Дефекты в ППУ слое ускоряют этот процесс – пустоты и трещины создают каналы для миграции водяного пара из окружающей среды к металлической трубе; конденсат скапливается на поверхности металла, особенно в областях с дефектами, где теплопередача наиболее интенсивна. Далее конденсат, содержащий примеси в виде солей и кислот из окружающей среды, вызывает электрохимическую коррозию металлической трубы, железо взаимодействует с кислородом и водой, образуя ржавчину [3–5].

Дефекты в ППУ слое образуются под воздействием следующих факторов:

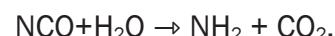
- технологических (неравномерное нанесение ППУ, нарушение температурно-временных режимов вспенивания, влажность компонентов);
- механических нагрузок (внешние удары, вибрации, внутреннее давление);
- термических напряжений (перепады температур между слоями).

Вспенивание полиуретана происходит в результате химической реакции, одновременно протекающей при смешивании изоцианата, полиола и воды. Изоцианат вступает в реакцию с водой или с влагой окружающей среды, образуя карбаминовую кислоту, которая затем разлагается на CO_2 и амины [6]. Параллельно изоцианаты и полиолы вступают в реакцию с образованием полиуретана. Образующийся газ CO_2 превращает полиуретан в пену [4]. В случае если ППУ нанесен неравномерно из-за неправильной подачи компонентов или некалиброванного оборудования, в отдельных зонах слоя возникает неравномерность плотности ППУ, например, плотность 40 кг/м³ в одной области и 80 кг/м³ в другой [5].

Также ввиду неравномерности нанесения ППУ слоя могут образоваться незаполненные участки. В зонах с низкой плотностью модуль Юнга ППУ снижается до $E \approx 0,01$ ГПа, что может вызывать локальные деформации при термических расширениях и трещины на границе раздела «более плотный ППУ – менее плотный ППУ» [7].

Немаловажным фактором является влажность компонентов заливки. Излишняя вода провоцирует чрезмерное образование CO_2 ,

что приводит к возникновению крупных пор и пустот, а также нестабильности в ячеистой структуре [8]:



Механические нагрузки, такие как внешние удары, вибрации, внутреннее давление, возникают при кратковременных, но интенсивных механических воздействиях на трубу, например, удар вызывает резкое сжатие или растяжение ППУ слоя⁵ [9].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Напряжения, возникающие в результате механических повреждений, можно оценить через уравнение упругости. Общий вид уравнения напряжений можно записать в виде закона Гука. Так, для пенополиуретана в изотропном виде уравнение выглядит следующим образом:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, МПа; ε_{kl} – тензор деформаций, МПа; C_{ijkl} – тензор жесткости ППУ упрощается до параметра модуля Юнга, МПа.

График зависимости напряжений до момента достижения предела прочности от деформаций для ППУ различной плотности приведен на рис. 3. Значения Модуля упругости и пределов прочности (табл. 1) для различных ППУ приблизительно равны нижней границе в соответствии с данными из справочной литературы [10].

Приведенные значения являются приблизительными, точные значения пределов прочности в значительной степени зависят от конкретного химического состава, производственного процесса – заготовки, распыления, формования и структуры ячеек [11, 12].

Ниже приведены приблизительные данные для жестких пенополиуретанов с закрытыми порами. Для более точных расчетов их необходимо сверять с техническим паспортом производителя [13].

Кроме того, одной из причин возникновения дефектов является возникновение термических напряжений (рис. 4). Данные напряжения возникают в материалах при изменении их температуры ΔT , когда де-

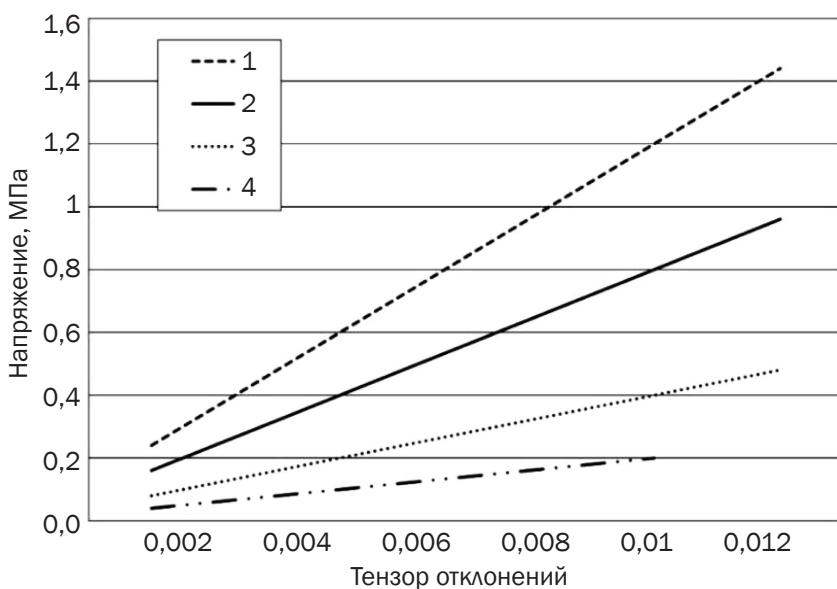


Рис. 2. Приблизительная зависимость тензора напряжений от тензора деформаций. Пенополиуретан плотностью, кг/м³: 1 – 100; 2 – 80; 3 – 60; 4 – 40

Fig. 2. Approximate dependence of the stress tensor on the strain tensor. Polyurethane foam density, kg/m³: 1 – 100; 2 – 80; 3 – 60; 4 – 40

Таблица 1. Пределы прочности для пенополиуретана различной плотности⁷

Table 1. Ultimate strength limits for polyurethane foam of various densities⁷

Плотность ППУ, кг/м ³	Модуль Юнга, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
40	20	0,2
60	40	0,5
80	80	1
100	120	1,5

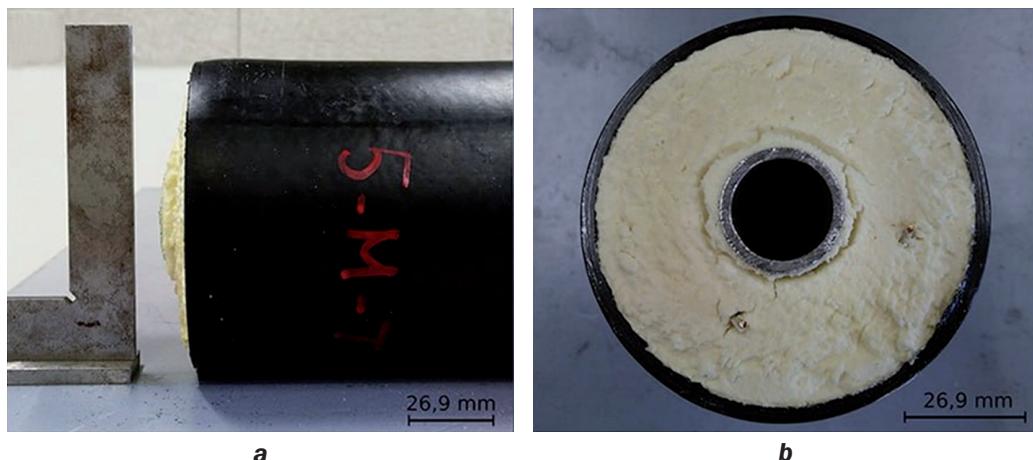


Рис. 3. Деформация и сжатие оболочки (а) и разрушение пены на границе раздела пена-сталь (б) [15]

Fig. 3. Deformation and compression of the shell (a) and foam fracture at the foam-steel interface (b) [15]

формация, вызванная тепловым расширением, ограничена другими материалами^{5,7} [5, 7, 8, 14].

ППУ изоляция постоянно подвергается воздействию повышенных температур от горячей стальной трубы, особенно внутренний

⁷Oertel G., Abele L. Polyurethane handbook: chemistry, raw materials, processing, application, properties. Munich; New York: Hanser; Cincinnati: Hanser/Gardner, 1994. Режим доступа: <https://archive.org/details/polyurethanehand0000unse>/mode/2up (дата обращения: 15.02.2025).

слой ППУ, и циклическим изменениям температуры. В первую очередь разрушаются наименее стабильные уретановые связи в полимерной матрице. В результате возникают снижение молекулярной массы полимера, возможное образование трещин, усадка, выделение летучих продуктов разложения, которые могут влиять на свойства замкнутых ячеек [16].

При изменении температуры ΔT материал стремится изменить свою длину по закону линейного теплового расширения:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad (2)$$

где L_0 – исходная длина, м; α – коэффициент теплового расширения, К⁻¹.

Если деформация ограничена, например, другими слоями или фиксацией, возникают напряжения. Для одномерного случая продольное расширение трубы определяется как

$$\sigma = E \alpha \Delta T, \quad (3)$$

где Е – модуль Юнга, МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рассматриваемом случае труба состоит из трех слоев с разными коэффициентами теплового расширения, модулями Юнга и коэффициентами Пуассона. Свойства материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Свойства материалов трехслойной трубы с пенополиуретаном, параметры пенополиуретана, согласно ГОСТ 30732–2020⁸ (EN 448:2016⁹)

Table 2. Properties of three-layer polyurethane foam pipe materials, polyurethane foam parameters according to GOST 30732-2020⁸ (EN 448:2016⁹)

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплового расширения, К ⁻¹	Модуль Юнга, ГPa	Коэффициент Пуассона	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Внешний диаметр слоя, мм	Внутренний диаметр слоя, мм	Толщина слоя, мм
Сталь (Ст3)	7850	12	210	0,3	45	32	26	3
Пенополиуретан	60	80	0,04	0,3	0,03	84	32	26
Полиэтилен	920	200	0,8	0,4	0,4	89,1	84	2,5

⁸ГОСТ 30732–2020. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. Введ. 11.08.2020. М.: Стандартинформ, 2020.

⁹EN 448:2016. District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Fitting assemblies of steel service pipes, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. Режим доступа: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/feeebe2c-2546-40a6-8081-10f97aeb8365/sist-en-448-2016> (дата обращения: 15.02.2025).

¹⁰DIN EN 253:2019. District heating pipes - Bonded single pipe systems for directly buried hot water networks - Factory made pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and a casing of polyethylene. Режим доступа: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d2d185d6-780e-4081-8161-a3b1e5b70ebf/en-253-2019> (дата обращения: 17.02.2025).

Определение относительных расширений для каждого слоя выявляется следующими формулами [17–19]:

$$\varepsilon_{\text{Ст3}} = \alpha_{\text{Ст3}} \Delta T; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{ППУ}} = \alpha_{\text{ППУ}} \Delta T; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{ПЭ}} = \alpha_{\text{ПЭ}} \Delta T. \quad (6)$$

В качестве объекта был выбран П-образный пролет в сети труб с ППУ изоляцией. Геометрические размеры трубы и пролета приведены на рис. 5.

Циклические тепловые нагрузки могут привести к накоплению усталостных повреждений, особенно в точках концентрации напряжений, характерных для геометрии соединения [9, 20].

Для моделирования температурных расширений необходимо задать граничные условия. Температура внутренней поверхности равна температуре теплоносителя $T = 130^{\circ}\text{C}$ ¹⁰. Температура окружающей среды T в пределах от -20 до +20°С с шагом в 5°С.

Методика моделирования в ANSYS (рис. 5–8) следующая: для начала проводится тепловой анализ Steady-State Thermal с учетом теплопередачи на внешней поверхности, далее – термомеханический анализ Static Structural для расчета напряжений от теплового расширения.

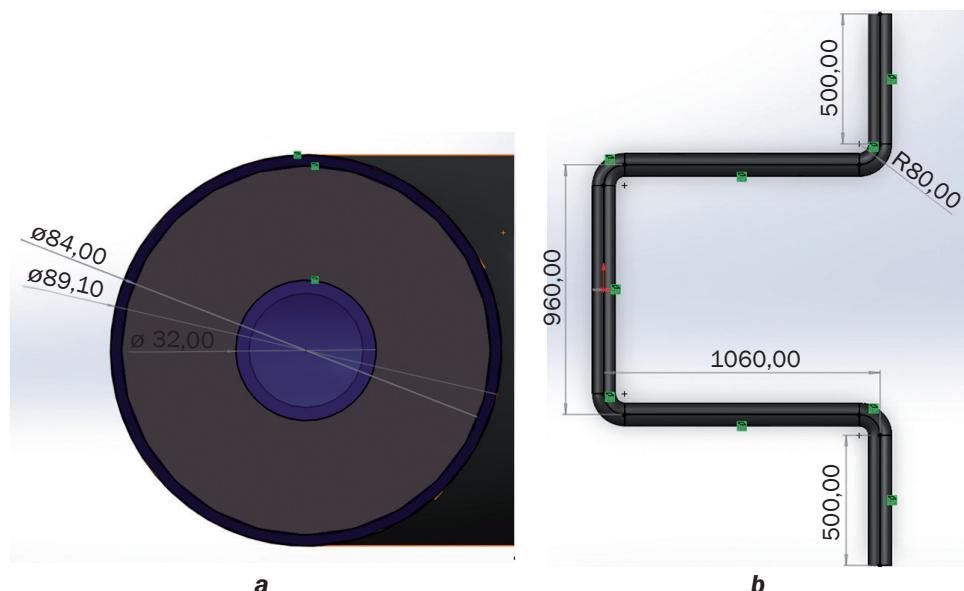


Рис. 4. Геометрические параметры П-образного пролета: а – в разрезе; б – габаритные размеры
Fig. 4. Geometric parameters of the U-shaped span: a – in section; b – overall dimensions

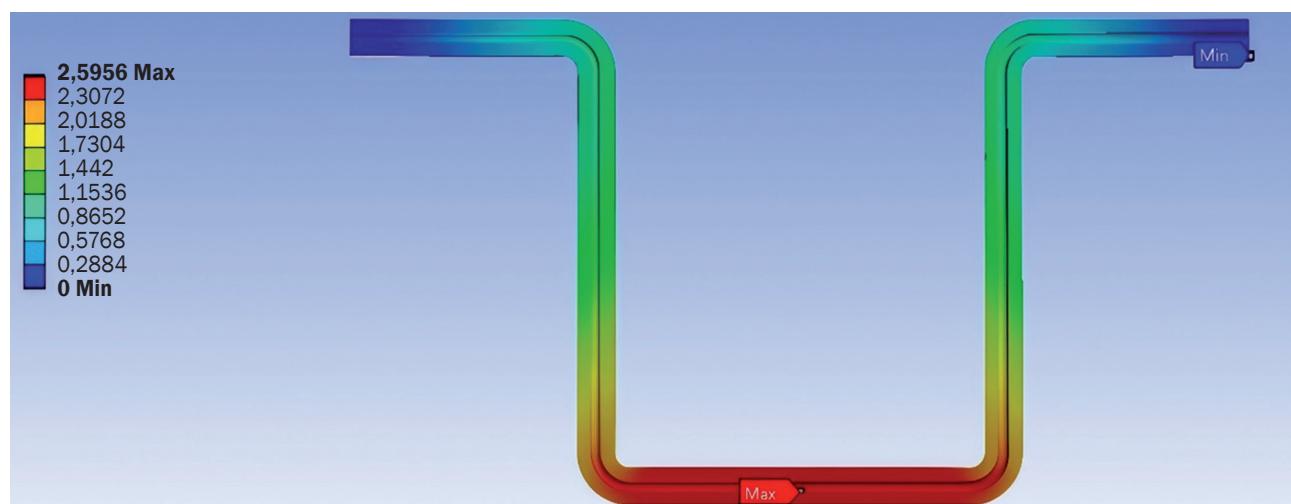


Рис. 5. Деформации П-образного пролета, возникающие в результате теплового расширения
Fig. 5. Deformations of the U-shaped span resulting from thermal expansion

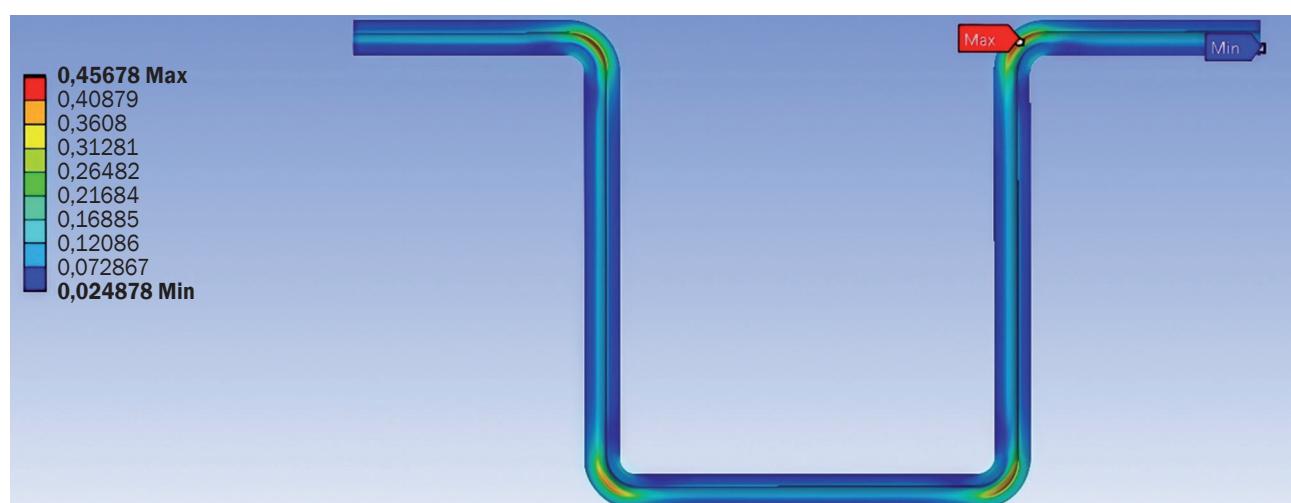


Рис. 6. Относительные отклонения П-образного пролета, возникающие в результате теплового расширения
Fig. 6. Relative deviations of the U-shaped span resulting from thermal expansion

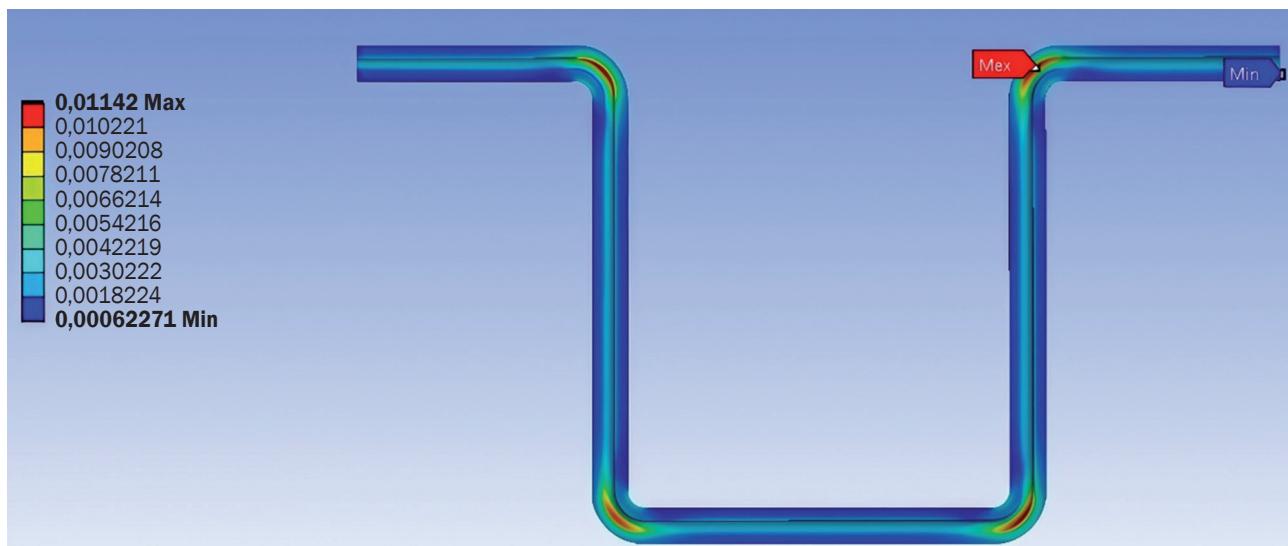


Рис. 7. Исследование напряжения фон Мизеса при тепловых расширениях в ANSYS
Fig. 7. Investigation of the von Mises stress during thermal expansion in ANSYS

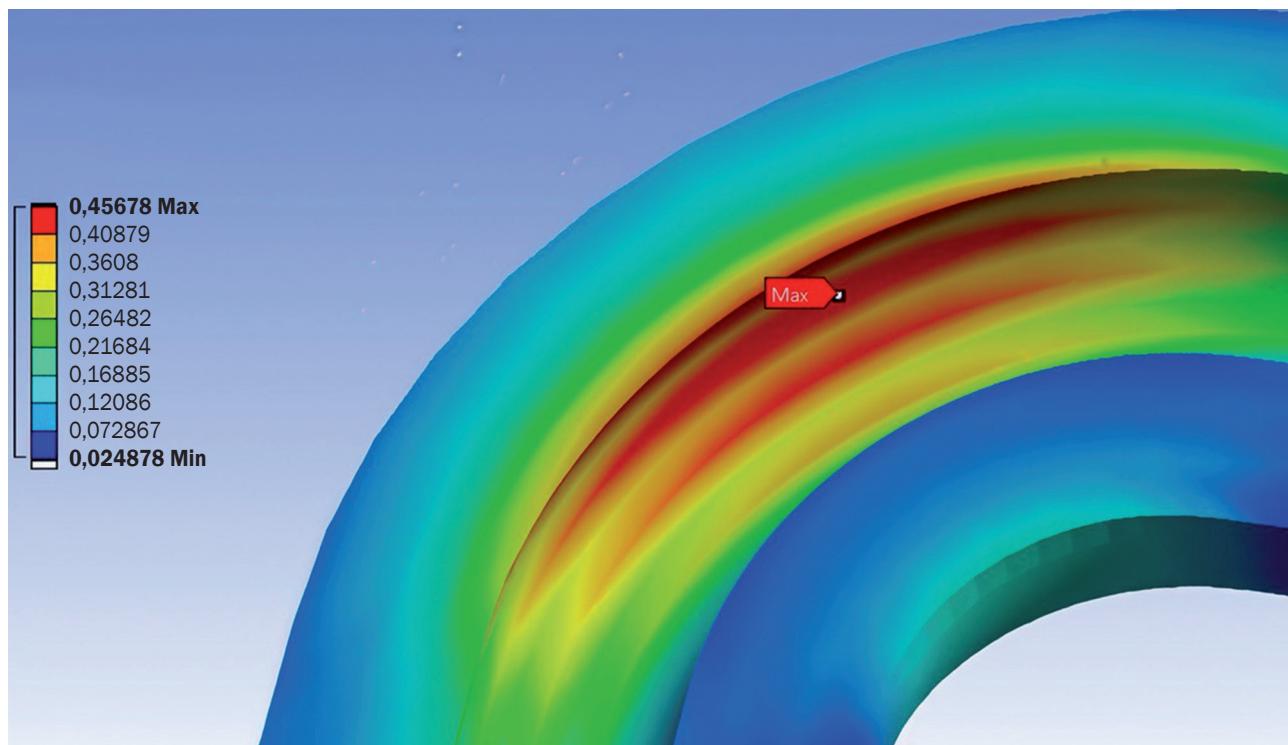


Рис. 8. Приближенный вид, демонстрирующий распределение напряжений в углах П-образного пролета
Fig. 8. Approximate view showing stress distribution at the corners of the U-shaped span

Полученные распределения расширений и напряжений в слое пенополиуретана дают четкое представление об участках возможного расположения дефектов, таких как отслоения или трещины. Области с наибольшим относительным расширением и возникающими напряжениями обладают наибольшей вероятностью возникновения отслоений и последующего разрушения как ППУ слоя, так и металлической оболочки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что углы в трубопроводах с полиуретановой изоляцией являются областями повышенных напряжений (см. рис. 8) при тепловом расширении из-за сочетания осевых усилий. Важно отметить, что полиуретановая изоляция испытывает значительное напряжение сдвига, поскольку она передает нагрузки между расширяющейся стальной трубой и внешней оболочкой.

Таблица 3. Полученные значения напряжений и относительных расширений при различной температуре окружающей среды

Table 3. Obtained values of stresses and relative expansions at different ambient temperatures

Температура окружающей среды, °C	Температура теплоносителя, °C	Разница температур, °C	Напряжение, МПа	Относительные расширения
20	130	110	0,33583	0,0083964
15		115	0,35095	0,0087744
10		120	0,36607	0,0091524
5		125	0,38119	0,0095304
0		130	0,39631	0,0099083
-5		135	0,41143	0,010286
-10		140	0,42654	0,010664
-15		145	0,44166	0,011042
-20		150	0,45678	0,01142

Проводя аналогичный анализ при различной температуре окружающей среды, были получены следующие данные о напряжениях и относительных расширениях в ППУ слое (табл. 3).

Результаты численного моделирования указывают на линейность в зависимости относительного расширения и создаваемого напряжения от температуры окружающей среды при постоянной температуре теплоносителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологические факторы в процессе производства могут привести к появлению таких дефектов, как пустоты, колебания плотности и участки с плохой адгезией. Механические нагрузки, включая удары при монтаже, а также вибрации от работающего оборудования

или внешних источников могут привести к образованию трещин, расслоению и усталостных напряжений. Однако термомеханический анализ, проведенный с использованием программного обеспечения ANSYS на типичном участке трубы П-образной формы, выявил критическую роль термических напряжений.

Согласно полученным данным при исследовании тепловых расширений, при относительном расширении ППУ слоя 0,01142, максимальное напряжение, возникающее в результате теплового расширения при разности температур теплоносителя и окружающей среды 150 °C, составляет 0,45678 МПа, что близко к пределу прочности и при периодическом расширении и сжатии, и может привести к различным повреждениям.

Список источников

1. Кузник И.В., Колубков А.Н., Ильин Е.Т., Белов В.М., Михайлов М.А., Плехов А.Г. [и др.]. Методы повышения энергоэффективности в централизованном теплоснабжении // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2017. № 10. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/metody-povysheniya-energoeffektivnosti-v-centralizovannom-teplosnabzhenii> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Горбунова Т.Г., Политова Т.О., Хабибуллин Р.М. Анализ повреждаемости тепловых сетей г. Казани и разработка рекомендаций для повышения их надежности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 7-8. С. 9–18. EDN: PHGNB.
3. Ostrogorsky A.G., Glicksman L.R., Reitz D.W. Aging of polyurethane foams // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1986. Vol. 29. Iss. 8. P. 1169–1176. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(86\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(86)90148-1).
4. Tesser R., Di Serio M., Scalfani A., Santacesaria E. Modeling of polyurethane foam formation // Journal of Applied Polymer Science. 2004. Vol. 92. Iss. 3. C. 1875–1886. <https://doi.org/10.1002/app.20170>.
5. McDonough W., Braungart M., Anastas P.T., Zimmerman J.B. Peer reviewed: applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design // Environmental Science and Technology. 2003. Vol. 37. Iss. 23. P. 434A–441A. <https://doi.org/10.1021/es0326322>.
6. Eriksson D., Sundén B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes // Journal of Thermal Envelope and Building Science. 1998. Vol. 22. Iss. 1. P. 49–71. <https://doi.org/10.1177/109719639802200105>.

7. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing // *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 153. P. 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.003>.
8. Gaidukovs S., Gaidukova G., Ivdre A., Cabulis U. Viscoelastic and thermal properties of polyurethane foams obtained from renewable and recyclable components // *Journal of Renewable Materials*. 2018. Vol. 6. Iss. 7. P. 755–763. <https://doi.org/10.7569/JRM.2018.634112>.
9. Menges G., Knipschild F. Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams // *Polymer Engineering and Science*. 1975. Vol. 15. Iss. 8. P. 623–627. <https://doi.org/10.1002/pen.760150810>.
10. Chen Yichong, Li Dongyang, Zhang Hong, Ling Yijie, Wu Kaiwen, Tao Liu, et al. Antishrinking strategy of micro-cellular thermoplastic polyurethane by comprehensive modeling analysis // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. Iss. 19. P. 7155–7166. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00895>. EDN: RUIENS.
11. Doyle L., Weidlich I., Illguth M. Anisotropy in polyurethane pre-insulated pipes // *Polymers*. 2019. Vol. 11. Iss. 12. P. 2074. <https://doi.org/10.3390/polym11122074>.
12. Doyle L., Weidlich I. Moisture uptake and effects of hydrothermal exposure on closed-cell semicrystalline polyethylene terephthalate foam // *Polymer Degradation and Stability*. 2022. Vol. 202. P. 110009. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110009>. EDN: GUGMWJ.
13. Pellizzi E., Lattuati-Derieux A., Lavédrine B., Cheradame H. Degradation of polyurethane ester foam artifacts: chemical properties, mechanical properties and comparison between accelerated and natural degradation // *Polymer Degradation and Stability*. 2014. Vol. 107. P. 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.018>.
14. Cotgreave T., Shortall J.B. Failure mechanisms in fibre reinforced rigid polyurethane foam // *Journal of Cellular Plastics*. 1977. Vol. 13. Iss. 4. P. 240–244. <https://doi.org/10.1177/0021955X7701300401>.
15. Doyle L., Weidlich I. Effects of thermal and mechanical cyclic loads on polyurethane pre-insulated pipes // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021. Vol. 44. Iss. 1. P. 156–168. <https://doi.org/10.1111/ffe.13347>. EDN: SQMJKG.
16. Yarahmadi N., Vega A., Jakubowicz I. Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam // *Polymer Degradation and Stability*. 2017. Vol. 138. P. 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.012>.
17. Kakroodi A.R., Khazabi M., Maynard K., Sain M., Kwon Oh-Sung. Soy-based polyurethane spray foam insulations for light weight wall panels and their performances under monotonic and static cyclic shear forces // *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 74. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.092>.
18. Johns A.I., Scott A.C., Watson J.T.R., Ferguson D., Clifford A.A. Measurement of the thermal conductivity of gases by the transient hot-wire method // *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Series: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1988. Vol. 325. Iss. 1585. P. 295–356. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0054>.
19. McLinden M.O., Klein S.A., Perkins R.A. An extended corresponding states model for the thermal conductivity of refrigerants and refrigerant mixtures // *International Journal of Refrigeration*. 2000. Vol. 23. Iss. 1. P. 43–63. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00024-9). EDN: LTDREZ.
20. Ridha M., Shim V.P.W. Microstructure and tensile mechanical properties of anisotropic rigid polyurethane foam // *Experimental Mechanics*. 2008. Vol. 48. Iss. 6. P. 763–776. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9146-0>. EDN: ZMUTPG.

References

1. Kuznik I.V., Kolubkov A.N., Il'in E.T., Belov V.M., Mikhailov M.A., Plekhov A.G., et al. Methods for improving energy efficiency in district heating. *Santehnika. Otoplenie. Kondicionirovaniye*. 2017;10. Available from: <https://www.c-o-k.ru/articles/metody-povysheniya-energoeffektivnosti-v-centralizovannom-teplosnabzhenii> [Accessed 15th February 2025]. (In Russ.).
2. Vankov Y.V., Ziganshin S.G., Gorbunova T.G., Politova T.O., Khabibullin R.M. Analysis of damage to heating systems Kazan and develop recommendations to improve reliability. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2012;7-8:9-18. (In Russ.). EDN: PHGNB.
3. Ostrogorsky A.G., Glicksman L.R., Reitz D.W. Aging of polyurethane foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1986;29(8):1169-1176. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(86\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(86)90148-1).
4. Tesser R., Di Serio M., Sclafani A., Santacesaria E. Modeling of polyurethane foam formation. *Journal of Applied Polymer Science*. 2004;92(3):1875-1886. <https://doi.org/10.1002/app.20170>.
5. McDonough W., Braungart M., Anastas P.T., Zimmerman J.B. Peer reviewed: applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design. *Environmental Science and Technology*. 2003;37(23):434A-441A. <https://doi.org/10.1021/es0326322>.
6. Eriksson D., Sundén B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. 1998;22(1):49-71. <https://doi.org/10.1177/109719639802200105>.
7. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing. *Polymer Degradation and Stability*. 2018;153:15-22. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.003>.

8. Gaidukovs S., Gaidukova G., Ivdre A., Cabulis U. Viscoelastic and thermal properties of polyurethane foams obtained from renewable and recyclable components. *Journal of Renewable Materials.* 2018;6(7):755-763. <https://doi.org/10.7569/JRM.2018.634112>.
9. Menges G., Knipschild F. Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams. *Polymer Engineering and Science.* 1975;15(8):623-627. <https://doi.org/10.1002/pen.760150810>.
10. Chen Yichong, Li Dongyang, Zhang Hong, Ling Yijie, Wu Kaiwen, Tao Liu, et al. Antishrinking strategy of microcellular thermoplastic polyurethane by comprehensive modeling analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research.* 2021;60(19):7155-7166. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00895>. EDN: RUIENS.
11. Doyle L., Weidlich I., Illguth M. Anisotropy in polyurethane pre-insulated pipes. *Polymers.* 2019;11(12):2074. <https://doi.org/10.3390/polym11122074>.
12. Doyle L., Weidlich I. Moisture uptake and effects of hydrothermal exposure on closed-cell semicrystalline polyethylene terephthalate foam. *Polymer Degradation and Stability.* 2022;202:110009. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110009>. EDN: GUGMWJ.
13. Pellizzi E., Lattuati-Derieux A., Lavédrine B., Cheradame H. Degradation of polyurethane ester foam artifacts: chemical properties, mechanical properties and comparison between accelerated and natural degradation. *Polymer Degradation and Stability.* 2014;107:255-261. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.018>.
14. Cotgreave T., Shortall J.B. Failure mechanisms in fibre reinforced rigid polyurethane foam. *Journal of Cellular Plastics.* 1977;13(4):240-244. <https://doi.org/10.1177/0021955X7701300401>.
15. Doyle L., Weidlich I. Effects of thermal and mechanical cyclic loads on polyurethane pre-insulated pipes. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures.* 2021;44(1):156-168. <https://doi.org/10.1111/fme.13347>. EDN: SQMJKG.
16. Yarahmadi N., Vega A., Jakubowicz I. Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability.* 2017;138:192-200. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.012>.
17. Kakroodi A.R., Khazabi M., Maynard K., Sain M., Kwon Oh-Sung. Soy-based polyurethane spray foam insulations for light weight wall panels and their performances under monotonic and static cyclic shear forces. *Industrial Crops and Products.* 2015;74:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.092>.
18. Johns A.I., Scott A.C., Watson J.T.R., Ferguson D., Clifford A.A. Measurement of the thermal conductivity of gases by the transient hot-wire method. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Series: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 1988;325(1585):295-356. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0054>.
19. McLinden M.O., Klein S.A., Perkins R.A. An extended corresponding states model for the thermal conductivity of refrigerants and refrigerant mixtures. *International Journal of Refrigeration.* 2000;23(1):43-63. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00024-9). EDN: LTDREZ.
20. Ridha M., Shim V.P.W. Microstructure and tensile mechanical properties of anisotropic rigid polyurethane foam. *Experimental Mechanics.* 2008;48(6):763-776. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9146-0>. EDN: ZMUTPG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Газизуллин Ильгиз Маратович,
аспирант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия
✉ ilgizgazizullin@mail.ru

Дмитриев Андрей Владимирович,
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия
ieremiada@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

Русаков Григорий Денисович,
студент,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия
grrusacov06@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Il'giz M. Gazizullin,
Postgraduate Student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia
✉ ilgizgazizullin@mail.ru

Andrei V. Dmitriev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation
of Technological Processes and Production,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia
ieremiada@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

Grigorii D. Rusakov,
Student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia
grrusacov06@mail.ru

Бадретдинова Гузель Рамилевна,
старший преподаватель кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия
nice.badretdinova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 29.07.2025 г.; принята к публикации 09.08.2025 г.

Guzel R. Badretdinova,
Senior Lecturer of the Department of Automation
of Technological Processes and Production,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia
nice.badretdinova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.06.2025; approved after reviewing 29.07.2025; accepted for publication 09.08.2025.