

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ СКОЛЬЗЯЩИЕ ОПОРЫ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Олег Александрович Борткевич¹, Владимир Германович Злобин²,
Валерий Викторович Пеленко², Владимир Геннадьевич Екимов³

¹ ООО «ПромЭС», г. Кострома

² Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург

³ АНО «Промбезопасность — Северо-Запад», Санкт-Петербург

© Борткевич О. А., Злобин В. Г., Пеленко В. В., Екимов В. Г., 2026

Автор-корреспондент: О. А. Борткевич, e-mail: mail@pipelinesystems.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается альтернативный тепловизионному метод учета тепловых потерь, основанный на расчете стационарного теплового потока от трубопровода через корпус опоры. Целью исследования определено выявление влияния типа конструкции опор трубопроводов тепловых сетей на тепловые потери через скользящие опоры. Задачами являются количественная оценка численными методами и сравнительный анализ тепловых потерь в случае подопорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой. Предметом исследования является процесс теплообмена между поверхностью скользящей опоры и подопорной конструкцией. В качестве объектов исследования рассмотрено два варианта размещения опоры: в первом варианте моделируется металлическая траверса, во втором варианте — железобетонная. Расчет проведен для конкретных объектов, а именно для скользящих опор трубопровода Ду 700 мм в случае подопорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой. Методы исследования базируются на использовании теоретических подходов: вычислительная математика, численный анализ. Для проведения расчетов стационарного теплового потока через корпус опоры трубопровода использована программа ЗЕНИТ-95. Результаты численного эксперимента показали, что при использовании железобетонных траверс стоек опор тепловые потери через поверхность скользящей опоры на 69 % меньше, чем при использовании металлической траверсы. Расчеты проведены для граничных условий четвертого рода на поверхности контакта. Тепловые потери составили $Q = 440$ Вт при средней температуре поверхности скользящей опоры трубопровода Ду 700 мм $+50^\circ\text{C}$ для металлической траверсы; тепловые потери составили $Q = 135$ Вт при средней температуре поверхности скользящей опоры трубопровода Ду 700 мм $+67^\circ\text{C}$ для железобетонной траверсы.

Ключевые слова: тепловая сеть, трубопровод, опоры, температурное поле, теплообмен, тепловые потери

Для цитирования: Борткевич О. А., Злобин В. Г., Пеленко В. В., Екимов В. Г. Расчет тепловых потерь через скользящие опоры трубопроводов тепловых сетей. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 102–110. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_102-110

CALCULATION OF HEAT LOSS THROUGH SLIDING SUPPORTS OF HEATING NETWORK PIPELINES

Oleg Alexandrovich Bortkevich¹, Vladimir Germanovich Zlobin², Valeriy Viktorovich Pelenko²,
Vladimir Gennadievich Ekimov³

¹ООО "PromES", Kostroma city

²Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg

³ANO Prombezopasnost — Severo-Zapad, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: O. A. Bortkevich, e-mail: e-mail@pipelinesystems.ru



ABSTRACT

This paper presents an alternative method to the thermographic method for assessing heat losses based on calculating the steady-state heat flux from the pipeline through the support structure. The aim of the study is to determine the influence of the design type of heating network pipeline supports on heat losses through slip surfaces. The research tasks are the numerical quantification and comparative analysis of heat losses for a support structure configured as a column fitted with either a metallic or a reinforced concrete traverse. The subject of the study is the heat transfer process between the slipping surface of the support and the underlying structure. As research objects, two support arrangement options are considered: the first model simulates a metal traverse, and the second — a reinforced concrete one. The analysis was carried out for specific cases: slip supports on a DN 700 mm pipeline, where the underlying structure is a column fitted with a metal or a reinforced concrete traverse. The research methods are based on theoretical approaches: computational mathematics and numerical analysis. The ZENIT-95 program was used to calculate the stationary heat flux through the pipeline support housing. The numerical experiment results demonstrated a 69% reduction in heat loss through the support's slipping surface when employing reinforced concrete traverses instead of metal ones. Calculations were performed for fourth-type boundary conditions on the contact surface. For the metal traverse, the heat loss was $Q = 440$ W at an average sliding surface temperature of $+50$ °C for the DN 700 mm pipeline support. For the reinforced concrete traverse, the heat loss was $Q = 135$ W at an average sliding surface temperature of $+67$ °C for the same pipeline.

Keywords: heating network, pipeline, supports, temperature field, heat exchange, heat loss

For citation: Bortkevich O. A., Zlobin V. G., Pelenko V. V., Ekimov V. G. (2026) Calculation of heat loss through sliding supports of heating network pipelines. *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 102–110, DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_102-110

ВВЕДЕНИЕ

Нормативной документацией на проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [1] принято учитывать тепловые потери опор трубопроводов как местные потери, с использованием повышающего коэффициента к потерям через тепловую изоляцию. В настоящее время существует большое количество разных видов опор, тепловые потери каждой из них индивидуальны и определить их возможно только при проведении тепловизионного обследования, что является трудоемким и дорогостоящим процессом. Другим вариантом учета тепловых потерь может служить расчет стационарного теплового потока от трубопровода через тепловую изоляцию [15, 16] и корпус опоры [14]. Проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей в настоящее время производят согласно рекомендациям в работе [1]. Для выбора тепловой изоляции оборудование разделяют по следующим параметрам:

- время работы в год: до 5000 ч / более 5000 ч;
- расположение оборудования в помещении / на открытом воздухе;
- рабочая среда с положительной / отрицательной температурой;
- тип прокладки трубопровода — канальная / бесканальная и т. д.

В зависимости от перечисленных параметров и условий, а также соразмерно диаметру трубопровода

нормы плотности теплового потока (Вт/м) выбирают по таблицам 2–12 [1] и умножают на коэффициент «К». Введение этого коэффициента учитывает изменение стоимости теплоты и теплоизоляционной конструкции в зависимости от района строительства и способа прокладки трубопровода. При этом для тепловых сетей при выборе тепловой изоляции расчетную температуру принимают по таблице 15 [1].

Для определения фактических тепловых потерь теплоты необходимо проведение тепловизионного обследования существующей теплотрассы, требующее существенных финансовых расходов. Учитывая, что при проведении проектирования теоретически возможно выполнить расчет тепловых потерь каждой опоры, в том числе в зависимости от конфигурации подпорных конструкций (рисунк 7), есть смысл избежать значительных финансовых и технических затрат. Таким образом, выбранная тема исследования «Расчет тепловых потерь через скользящие опоры трубопроводов тепловых сетей» представляется актуальной. Необходимо подчеркнуть, что при выполнении подобных теоретических вычислительных расчетов не следует ограничиваться только местом контакта опоры и поверхности скольжения. В целях повышения точности результатов численного анализа при расчетах необходим учет геометрии и внешних условий строительных конструкций.



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предметом изучения в данной работе является процесс теплообмена между поверхностью скольжения опоры и подпорной конструкцией. В качестве объектов исследования рассмотрено два варианта размещения опоры — в первом варианте моделируется металлическая траверса, во втором варианте — железобетонная траверса. Расчет проведен для конкретных объектов, а именно для скользящих опор трубопровода Ду 700 мм в случае подпорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой. **Методы** исследования базируются на использовании теоретических подходов, таких, как, формализация, математическое моделирование, вычислительная математика, численный анализ. Для проведения расчетов стационарного теплового потока через корпус опоры трубопровода использована программа ЗЕНИТ-95.

В статье исследован теплообмен между поверхностью скольжения опоры и подпорной конструкцией, который корректно осуществляется с учетом коэффициента теплопередачи в контакте металл-металл [3, 5]. При этом необходимо отметить, что характер и степень влияния влаги на процесс теплообмена зависит от свойств воды. Обессоленная вода является относительно плохим проводником теплоты, поэтому её нахождение в контактной зоне может снизить интенсивность общей теплопередачи. При наличии в воде растворённых солей, её теплопроводность может возрасти. Кроме того, так как вода может испаряться при нагревании, то это приводит к конвективному переносу теплоты, в результате которого общая теплопередача может или интенсифицироваться, или уменьшаться в зависимости от конкретных условий [6]. В связи с тем, что и корпус опоры, и поверхность скольжения покрываются антикоррозионным покрытием и окрашиваются, то вода в шероховатую поверхность контакта поступает только после истирания слоев краски [7], что может быть учтено в математической модели расчета [11]–[13]. Предлагаемый подход к теоретическому анализу процесса теплообмена посредством численного эксперимента позволяет учитывать наличие дополнительного контактного термического сопротивления, что составляет определенную новизну.

Таким образом, целью исследования определено выявление количественного влияния типа конструкции опор трубопроводов тепловых сетей на тепловые потери через скользящие опоры.

Задачами исследования являются количественная оценка температурного поля в опорной конструкции трубопровода численным методом, установление интенсивности процесса теплообмена между поверхностью скольжения

опоры и подпорными элементами, сравнительный анализ тепловых потерь в случае подпорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой, а также формирование исходных данных для расчета.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проведения корректных расчетов стационарного теплового потока через корпус опоры трубопровода и получения адекватных результатов использована программа ЗЕНИТ-95 — продукт научно-технического предприятия «ДИП», предназначенный для выполнения проектных и научно-исследовательских расчетов разнообразных пространственных конструкций на персональных ЭВМ методом конечных элементов, в том числе для расчета тепловых полей при стационарных и нестационарных условиях. Отличительной особенностью программы от отечественных и зарубежных аналогов является возможность решения как традиционных задач в рамках допущения о малых возмущениях, так и сложных нелинейных задач в условиях больших возмущений.

В работе рассматривается участок подпорной конструкции (траверса) длиной 2400 мм (рисунок 2). Поверхность теплообмена с колонной задана через металлические пластины 500×160 мм на траверсе в местах расположения стоек (рисунки 1, 2).

При этом приняты следующие допущения:

- температура стенки трубы принимается равной температуре теплоносителя;
- теплота от трубы к элементам конструкции передается без потерь;
- отсутствует теплообмен между боковыми сторонами корпуса опоры и внешней средой, так как часть опоры находится под тепловой изоляцией;
- все конструктивные части модели рассматриваются как единое целое, то есть рассматривается идеальный тепловой контакт между ними, когда температура двух тел, соприкасающихся друг с другом и тепловые потоки одинаковы (граничные условия четвертого рода).

Схема направления распространения теплового потока и распределения температур приведена на рисунке 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения численного эксперимента рассмотрена скользящая опора для трубы Ду 700 мм, Серия 5.903–13 (рисунок 1). Предусмотрено три варианта высоты опоры: 185, 235 и 285 мм. Нужный вариант опоры можно подобрать на основании толщины теплоизоляционного материала. В настоящей статье рассмотрим опоры



высотой 185 мм. Опора приварная (седло) приваривается к трубе вдоль оси с двух сторон, поверхность скольжения имеет площадь $S_{ск}=0,17 \text{ м}^2$. При этом, часть поверхности опирается на металлическую пластину траверсы — её площадь $S_{оп}=0,09 \text{ м}^2$, другая часть поверхности нависает над пластиной и контактирует с воздухом — её площадь $S_{в}=0,08 \text{ м}^2$. Вдоль оси трубы длина опоры составляет $L=340 \text{ мм}$, перпендикулярно оси трубы $B=500 \text{ мм}$.

Подопорная конструкция может представлять стойку с металлической или железобетонной траверсой или железобетонный фундамент с пластиной скольжения на закладных деталях.

В первом варианте в качестве подопорной конструкции рассмотрим металлическую стойку ОП-102 [7] с траверсой Т6. Траверса представляет собой коробчатое сечение из двух швеллеров 20П, скрепленных между собой металлическими пластинами толщиной 7 мм, закрепляется на стойке через металлические пластины толщиной 16 мм.

Во втором варианте расчета рассматриваем железобетонную траверсу таких же геометрических размеров, как и в первом случае.

Теплота от трубы (рисунок 1) передается через торцы гнутой пластины (рисунок 2, поз. 1) на торцы обеих опорных пластин (рисунок 2, поз. 2) и воздушной прослойке между пластинами, формируя тем самым в конструкции определенное поле температур (рисунок 5).

При размещении на открытом воздухе в теплообмене корпуса опоры и окружающей среды участвует ветер, что приводит к интенсификации конвективного теплообмена с окружающей средой [8]–[10]. В таблице В.2 работы [4] приведены значения коэффициента теплоотдачи. В расчетах принимаем $\alpha_1 = 11 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$.

Для расчета стационарного теплообмена выбираем поверхность конвективного теплообмена с окружающей средой со среднегодовой температурой $+5 \text{ °C}$. При этом коэффициент теплопередачи можно вычислить по методике [4]. Примем его равным $\alpha_2 = 128 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$, что существенно больше коэффициента α_1 .

Результаты расчета температурных полей в корпусе опоры для металлической и железобетонной траверсы в программе ЗЕНИТ-95 приведены на рисунках 3 и 4.

Динамика хода формирования поля температур в направлении теплопередачи приведена на рисунке 5.

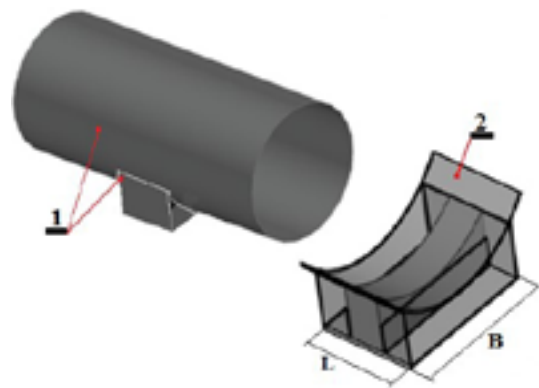


Рисунок 1. Опора трубы Ду 700 мм, Серия 5.903–13: 1 — общий вид, 2 — схема опоры

Figure 1. Pipe support Dy 700 mm, serial number 5.903–13: 1 — general view, 2 — support diagram

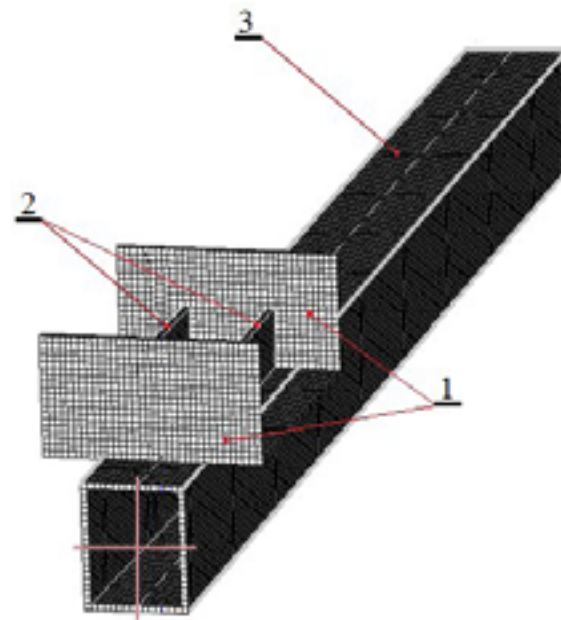


Рисунок 2. Модель опоры на траверсе: 1 — боковые пластины, $s=8 \text{ мм}$; 2 — опорные пластины (2 шт.), $s=8 \text{ мм}$; 3 — траверса, швеллер 20 (2 шт.)

Figure 2. Support model on a traverse: 1 — side plates, $s=8 \text{ mm}$; 2 — support plates (2 pcs.), $s=8 \text{ mm}$; 3 — traverse, channel 20 (2 pcs.)

Распределение интенсивности теплового потока на поверхности скольжения опоры с железобетонной и металлической траверсой иллюстрируется цифровыми данными, приведенными на рисунке 6.

Визуализация интенсивности теплового потока через поверхность скольжения опоры при использовании различных материалов траверс приведена также на рисунках 6а и 6б. Количественные результаты численного расчета тепловых потерь приведены в таблице 1.

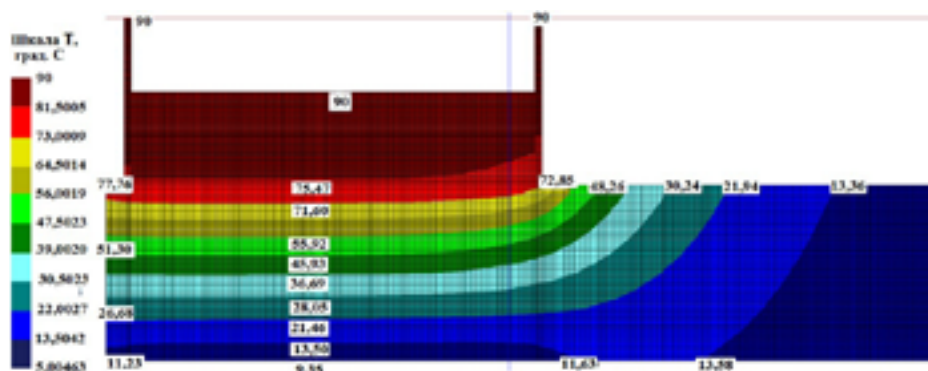


Рисунок 3. Температурное поле в корпусе опоры и металлической трассе. Температура теплоносителя +90 °С, температура окружающей среды +5 °С

Figure 3. Temperature pattern in support housing and metal traverse. Heat carrier medium temperature +90 °С, environmental temperature +5 °С

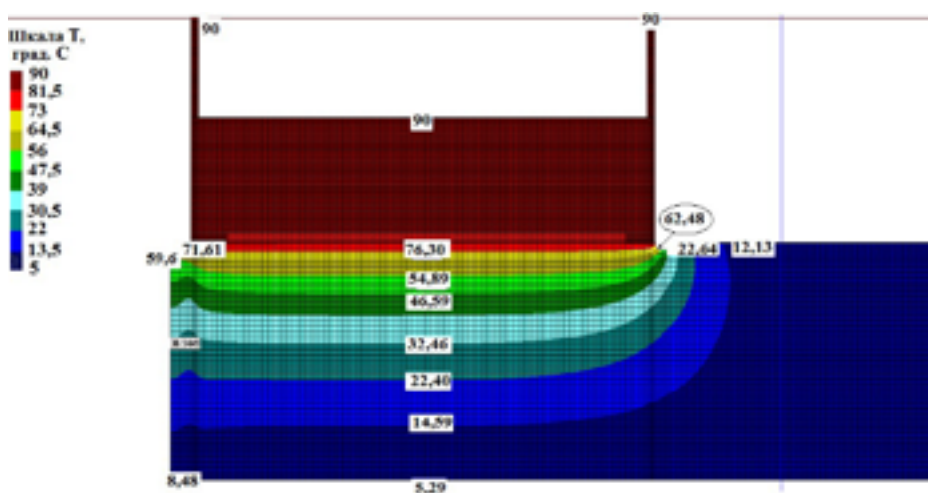


Рисунок 4. Температурное поле в корпусе опоры и железобетонной трассе. Температура теплоносителя +90 °С, температура окружающей среды +5 °С

Figure 4. Temperature pattern in support housing and reinforced concrete traverse. Heat carrier medium temperature +90 °С, environmental temperature +5 °С

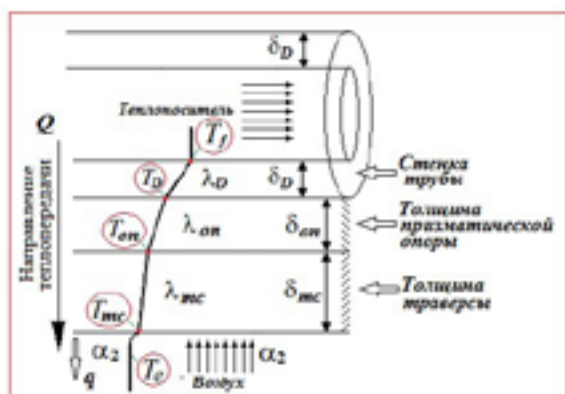


Рисунок 5. Динамика распределения поля температур в направлении теплопередачи

Figure 5. Dynamics of the temperature field distribution in the direction of heat transfer

Таблица 1. Результаты расчета тепловых потерь через опоры трубопровода в зависимости от материала опорной трассы

Table 1. Results of calculating thermal losses through pipeline supports depending on the material of the support traverse

Материал трассы	Суммарные потери, Qоп, Вт	Средняя температура на поверхности контакта, °С
Металл СтЗпс	440	50
Железобетон В20	135	67

Тепловые потери опоры на поверхности определены по результатам расчета как произведение средней интенсивности теплового потока через поверхность скольжения и величины площади поверхности скольжения.

Расчеты проведены для граничных условий четвертого рода на поверхности контакта при следующих условиях:

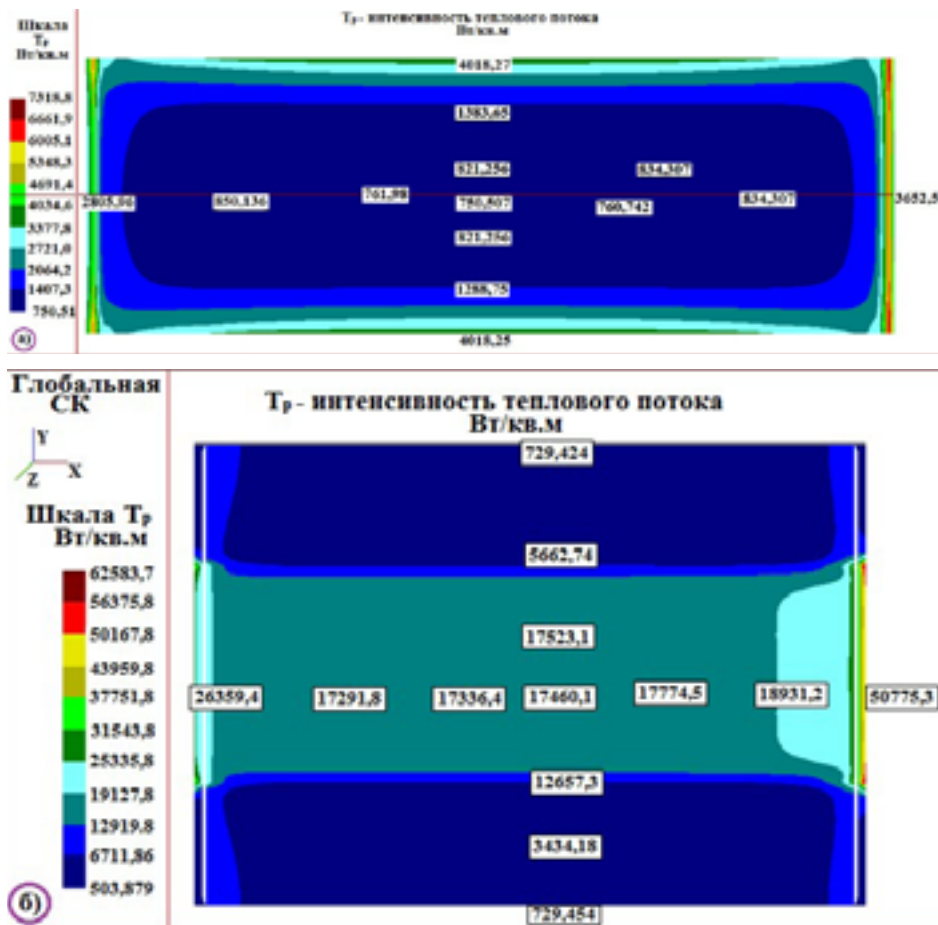


Рисунок 6. Распределение интенсивности теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$): а) на поверхности скольжения опоры с железобетонной траверсой; б) на поверхности скольжения опоры с металлической траверсой

Figure 6. Heat flux intensity distribution (W/m^2): а) on the slipping surface of the support with reinforced concrete traverse; б) on the slipping surface of the support with metal traverse

— средняя температура поверхности скольжения опоры трубопровода Ду 700 мм при использовании металлической траверсы составила $+50^\circ\text{C}$, тепловые потери при этом составили величину $Q=440$ Вт;

— средняя температура поверхности скольжения опоры трубопровода Ду 700 мм при использовании железобетонной траверсы составила $+67^\circ\text{C}$, тепловые потери составили $Q=135$ Вт.

Аналогично расчетам [6], исходя из коэффициента местных потерь [1], расчетные тепловые потери на трубу с опорой при температуре рабочей среды 150°C для трубопровода Ду 700 мм составят нижеследующие значения. При этом расчет ведем, исходя из размера опоры вдоль оси трубы $L=340$ мм — под эту величину приведем нормативные потери трубы Ду 700 мм. По нормам плотности теплового потока трубопроводов при расположении на открытом воздухе и числе часов

работы более 5000 (таблица 2 [1], $Q_n=170$ Вт) тепловые потери составят:

$$Q'_n = Q_n \cdot K_n = 170 \cdot 1,3 = 221 \text{ Вт} \quad (1)$$

Здесь $K_n=1,3$ — коэффициент, учитывающий дополнительные тепловые потери через опоры и арматуру.

Таким образом, тепловые потери трубы с учетом местных тепловых потерь на металлической траверсе, рисунок 6б, превышают нормативные значения ($Q_{\text{н}}=440$ Вт больше, чем $Q'_n=221$ Вт), тепловые потери метра трубы с учетом местных тепловых потерь на железобетонной траверсе, рисунок 6а, не превышают нормативные значения ($Q_{\text{н}}=135$ Вт меньше, чем $Q'_n=221$ Вт). В целях повышения энергоэффективности наружных тепловых сетей рекомендуется применять в качестве траверс отдельно стоящих опор железобетонные изделия, толщину изоляции следует выбирать исходя из расчетных потерь тепла. На рисунке 7 приведен пример одного из вариантов конструкции такой опоры.

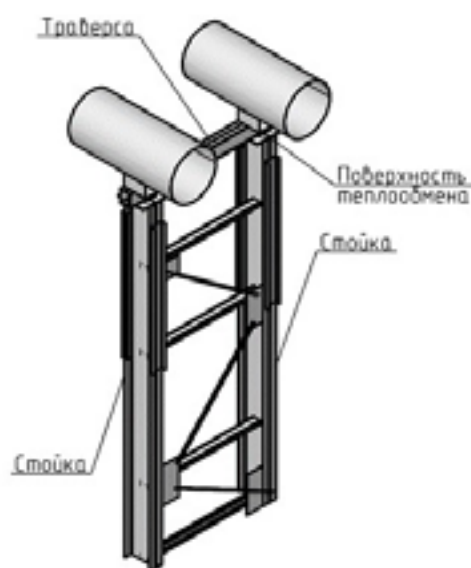


Рисунок 7. Опора ОП-102 как один из вариантов конфигурации подопорных конструкций

Figure 7. OP-102 support as one of its underlying structure configuration options

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат численного эксперимента показал, что при использовании железобетонных траверс стоек опор тепловые потери через поверхность скольжения опоры на 69 % меньше, чем при использовании металлической траверсы:

$$\varphi = \frac{135 - 440}{440} \cdot 100\% = -69\%.$$

Доказана целесообразность использования железобетонных траверс.

Для расчета тепловых потерь через опоры трубопровода следует проводить вычисления с учетом геометрических характеристик и применяемых материалов подопорных конструкций, а также условия контакта соприкасающихся поверхностей и внешней среды.

Список литературы

1. СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов». М., 2012.
2. СНиП 2.01.07–85 (2003) Нагрузки и воздействия.
3. Василевич Ю. В., Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А., Яковлев А. А. Анализ напряженно-деформированного состояния и температурного поля деформируемого растяжением образца // Теоретическая и прикладная механика. 2023. Вып. 38. С. 61–71.

4. Геренштейн А. В., Машрабов Н., Королькова Л. И., Геренштейн Е. А. Дифференциально-разностный метод для третьей смешанной задачи одномерной теплопроводности с непостоянными коэффициентами // Актуальные вопросы агроинженерных наук в сфере технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности: теория и практика: материалы национальной научной конференции Института агроинженерии. / Под редакцией С. А. Гриценко. 2020. С. 82–91.
5. Губарева К. В., Попов А. И., Зинина С. А., Шульга А. С., Чуянов Д. О. Моделирование процесса теплообмена в пластине с переменными теплофизическими свойствами // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 6. С. 52–57.
6. Канарейкин А. И. Процесс стационарной теплопроводности в стержне при наличии внешнего теплообмена // Chronos. 2022. Т. 7. № 4 (66). С. 60–62.
7. Канарейкин А. И. Особенность изменения поведения температурного поля в твэлах при переходе от цилиндрического к эллиптическому сечению при граничных условиях первого рода // Научные известия. 2022. № 29. С. 174–177.
8. Канарейкин А. И. Теплообмен между нагревательным элементом цилиндрической формы и его оболочкой при граничных условиях четвертого рода. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 3. С. 68–73. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-68-73.
9. Канарейкин А. И. Стационарное температурное поле в прямоугольной пластине с переменной теплопроводностью по одной координате. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 99–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-99-104.
10. Мойсейчик А. Е., Яковлев А. А. Расчет температуры поверхности и напряженно-деформированного состояния упруго-пластических тел из стали при их нагружении // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественнонаучных и технических дисциплин: сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, посвящ. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова. БГТУ им. В. Г. Шухова; Белгород, 16–17 мая 2023. Ч. 20. С. 218–224. URL: https://www.bstu.ru/research/graduation_candidacy/otdel_oonirs/conf (дата доступа: 28.06.2024).
11. Мойсейчик Е. А., Мойсейчик А. Е., Яковлев А. А. Визуализация кинетики пластических деформаций в стальных изделиях по инфракрасному излучению / Е. А. Мойсейчик, // Механика машин, механизмов и материалов. 2024. № 3 (68). С. 78–87; а также Мойсейчик, Е. А. Выявление опасных состояний и контроль разрушения в стальных растянутых элементах тепловым // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2023. № 2 (48). С. 22–29.
12. Соболев И. С., Бранфилова А. Н. Численное исследование характеристик изоляционного материала трубопроводов // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов конференции. 2020. С. 212–215.



13. Яковлев А. А., Мойсейчик Е. А., Мойсейчик А. Е. Стальная трехслойная ортотропная плита и ее работа при квазистатическом нагружении // Теоретическая и прикладная механика. 2023. Вып. 38. С. 201–206.
14. Chen K. H., Kao J. H., Chen J. H. A new error estimation technique for solving torsion bar problem with inclusion by using BEM // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2020. Vol. 115. Pp. 168–211.
15. Dumont N. A. Complex-variable, high-precision formulation of the consistent boundary element method for 2D potential and elasticity problems // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023. Vol. 152. Pp. 552–574.
16. Hachem E. et al. Deep reinforcement learning for the control of conjugate heat transfer // Journal of Computational Physics. 2021. Vol. 436. P. 110317.
17. Zanolli S. M., Pepe C., Astolfi G., Moscoloni E. Analysis and modeling of steel industry reheating furnace billets temperature. // 2022. 23-rd International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2022. Pp. 337–342.

References

1. SP 61.13330.2012 “Thermal Insulation of Equipment and Pipelines”, Moscow: 2012.
2. SNiP 2.01.07–85 (2003) Loads and Impacts.
3. Vasilevich Yu. V., Moiseychik A. E., Moiseychik E. A., Yakovlev A. A. Analysis of the Stress-Strain State and Temperature Field of a Specimen Deformed by Tension // Theoretical and Applied Mechanics. 2023. Issue 38. Pp. 61–71.
4. Gerenshtein A. V., Mashrabov N., Korolkova L. I., Gerenshtein E. A. Differential-Difference Method for the Third Mixed Problem of One-Dimensional Heat Conduction with Non-Constant Coefficients. In the collection: Current issues of agricultural engineering in the field of technical service of machines, equipment and life safety: theory and practice. Proceedings of the national scientific conference of the Institute of agricultural engineering. Edited by S. A. Gritsenko. 2020. Pp. 82–91.
5. Gubareva K. V., Popov A. I., Zinina S. A., Shulga A. S., Chuyanov D. O. Modeling of the heat transfer process in a plate with variable thermophysical properties // Scientific Review. Technical sciences. 2020. No. 6. Pp. 52–57.
6. Kanareikin A. I. The process of steady-state heat conduction in a rod in the presence of external heat transfer // Chronos. 2022. Vol. 7. No. 4 (66). Pp. 60–62.
7. Kanareikin A. I. Peculiarity of Change in Temperature Field Behavior in Fuel Elements upon Transition from Cylindrical to Elliptical Cross-Section under Boundary Conditions of the First Kind // Scientific News. 2022. No. 29. Pp. 174–177.
8. Kanareikin A. I. Heat Transfer between a Cylindrical Heating Element and Its Shell under Boundary Conditions of the Fourth Kind // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2023. No. 3. Pp. 68–73. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-68-73.
9. Kanareikin A. I. Stationary temperature field in a rectangular plate with variable thermal conductivity along one coordinate. // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2023. No. 1. Pp. 99–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-99-104.
10. Moiseychik A. E., Yakovlev A. A. Calculation of surface temperature and stress-strain state of elastic-plastic steel bodies under loading // Fundamental and applied research in the field of natural sciences and engineering disciplines: collection of reports. Int. scientific and technical. conf. of young scientists, dedicated to the 170th anniversary of V. G. Shukhov's birthday [Electronic resource] / BSTU named after V. G. Shukhov; Belgorod, May 16–17, 2023. Part 20. Pp. 218–224. Access mode: https://www.bstu.ru/research/graduation_candidacy/-otdel_oonirs/conf. Access date: June 28, 2024.
11. Moiseychik E. A., Moiseychik A. E., Yakovlev A. A. Visualization of the kinetics of plastic deformations in steel products using infrared radiation // Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2024. No. 3 (68). Pp. 78–87; also Moiseychik, E. A. Identification of hazardous conditions and fracture control in steel tension elements using the thermal method / E. A. Moiseychik, A. E. Moiseychik, A. A. Yakovlev // Bulletin of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences. 2023. No. 2 (48). Pp. 22–29.
12. Sobolev I. S., Branfileva A. N. Numerical study of the characteristics of pipeline insulating material // Science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers of the conference. 2020. Pp. 212–215.
13. Yakovlev A. A. Steel three-layer orthotropic plate and its performance under quasi-static loading / A. A. Yakovlev, E. A. Moiseychik, A. E. Moiseychik // Theoretical and Applied Mechanics. 2023. Issue. 38. Pp. 201–206.
14. Chen K. H., Kao J. H., Chen J. H. A new error estimation technique for solving torsion bar problem with inclusion by using BEM // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2020. Vol. 115. Pp. 168–211.
15. Dumont N. A. Complex-variable, high-precision formulation of the consistent boundary element method for 2D potential and elasticity problems / N. A. Dumont // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023. Vol. 152. Pp. 552–574.
16. Hachem E. et al. Deep reinforcement learning for the control of conjugate heat transfer // Journal of Computational Physics. 2021. Vol. 436. P. 110317.
17. Zanolli S. M., Pepe C., Astolfi G., Moscoloni E. Analysis and modeling of steel industry reheating furnace billets temperature. // 2022. 23-rd International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2022. Pp. 337–342.



■ Информация об авторах

Борткевич Олег Александрович, ООО «ПромЭС», Россия, г. Кострома, Михалёвский бульвар, д. 11 а, пом. 14; e-mail: mail@pipelinesystems.ru.

Злобин Владимир Германович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 4015-0144, Author ID: 957934; e-mail: zlobin_v@list.ru.

Пеленко Валерий Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 6851-4249, Author ID: 714215; e-mail: pelenko1@rambler.ru.

Екимов Владимир Геннадьевич, директор АНО «Промбезопасность — Северо-Запад», Россия, Санкт-Петербург, Набережная Обводного канала, 211–213; e-mail: ekimov@prom-exp.ru.

■ Information about the authors

Bortkevich Oleg Alexandrovich, LLC "PromES", 11 A, suite 14, Mikhalyovsky Boulevard, Kostroma, Russia; e-mail: mail@pipelinesystems.ru.

Zlobin Vladimir Germanovich, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 4015-0144, Author ID: 957934, e-mail: zlobin_v@list.ru.

Pelenko Valery Viktorovich, Doc. Sci in Engineering, Professor, Professor at the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN code: 6851-4249, Author ID: 714215, e-mail: pelenko1@rambler.ru.

Ekimov Vladimir Gennadievich, Director of ANO "Prombezopasnost — Severo-Zapad", 211-213 Obvodny Canal Embankment, St. Petersburg, Russia; e-mail: ekimov@prom-exp.ru.

