

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-115-125
УДК 621.1.016.4



РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Л.И. Кутепова, А.Д. Маркова,
Е.Г. Скачкова*

В технике часто используется явление теплопередачи через цилиндрические стенки и разнообразные оболочки, образованные вращением плоских фигур вокруг неподвижной оси. Такие конструктивные элементы широко применяются в конденсаторах паротурбинных установок, в деталях проточной части газовых турбин, ракетных и авиационных двигателей. В статье описано решение задачи рационального выбора теплоизоляционного материала и его геометрических характеристик при использовании теплоизоляции для уменьшения тепловых потерь от цилиндрических поверхностей. Результаты расчета теплоизоляции трубы представлены графически. Выполненный анализ позволяет сформулировать обобщённый вывод: рациональный выбор изоляции возможен только лишь в том случае, когда увеличению её толщины сопутствует увеличение термического сопротивления всей модели.

Ключевые слова: теплоизоляция; коэффициент теплопроводности; линейное термическое сопротивление

Для цитирования. Кутепова Л.И., Маркова А.Д., Скачкова Е.Г. Решение задачи рационального выбора теплоизоляционного материала и его геометрических характеристик // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13, № 1. С. 115-125. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-115-125

SOLVING THE PROBLEM OF RATIONAL CHOICE OF THERMAL INSULATION MATERIAL AND ITS GEOMETRIC CHARACTERISTICS

*L.I. Kutepova, A.D. Markova,
E.G. Skachkova*

In engineering, the phenomenon of heat transfer through cylindrical walls and various shells formed by the rotation of flat figures around a fixed axis is often used. Such structural elements are widely used in condensers of steam turbine installations, in the details of the flow part of gas turbines, rocket and aircraft engines. The article describes the solution of the problem of rational choice of thermal insulation material and its geometric characteristics when using thermal insulation to reduce heat losses from cylindrical surfaces. The results of the calculation of the thermal insulation of the pipe are presented graphically. The performed analysis allows us to formulate a generalized conclusion: a rational choice of insulation is possible only if an increase in its thickness is accompanied by an increase in the thermal resistance of the entire model.

Keywords: *thermal insulation; thermal conductivity coefficient; linear thermal resistance*

For citation. *Kutepova L.I., Markova A.D., Skachkova E.G. Solving the Problem of Rational Choice of Thermal Insulation Material and Its Geometric Characteristics // International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 115-125. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-115-125*

Введение

В инженерной практике и в быту зачастую приходится ограничивать тепловые потоки теплопередачей от разнообразных теплотехнических устройств и трубопроводов. С этой целью используются различные теплоизоляционные материалы, которыми покрывают

теплотехнические устройства и трубопроводы. Как правило, теплоизоляционные покрытия размещают с наружной поверхности устройств и гораздо реже – внутри аппаратов и трубопроводов [2].

Большой интерес представляет задача рационального выбора теплоизоляционного материала и его геометрических характеристик, целью которого является уменьшение тепловых потерь от цилиндрической трубы в результате правильно подобранных параметров. Грамотный подход в выборе теплоизоляции обеспечивает низкую стоимость теплопередающей поверхности [3]. При решении поставленной задачи необходимо найти зависимость критического диаметра от выбора теплоизоляционного материала и диаметра трубы. Особенно привлекателен такой подход тем, что позволяет обходиться без проведения дорогостоящих экспериментов и получать простые решения для широкого круга задач [1].

Материалы и методы исследования

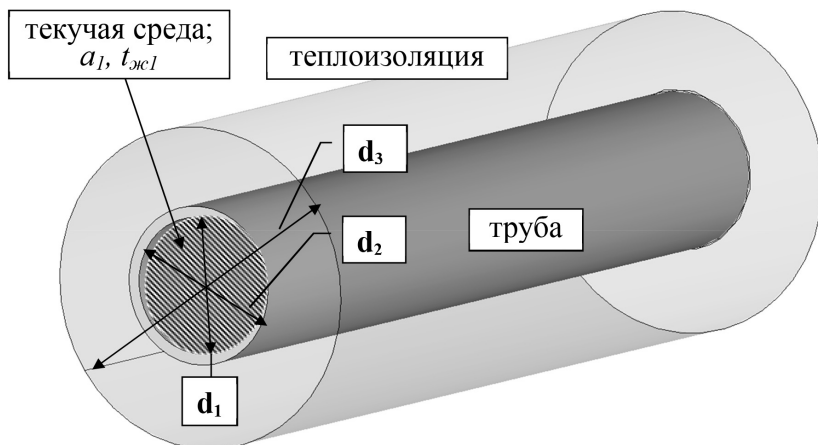


Рис. 1. Геометрическая схема модели теплопередачи теплоизолированной цилиндрической трубой

С целью решения задачи рационального выбора теплоизоляционного материала и его геометрических характеристик рассма-

тривалась цилиндрическая труба с внутренним диаметром d_1 и наружным – d_2 . Коэффициент теплопроводности материала трубы равен λ . Внутри трубы движется текучая среда с температурой $t_{ж1}$, коэффициент теплоотдачи от которой к трубе равен α_1 . Труба снаружи покрыта слоем теплоизоляционного материала, коэффициент теплопроводности которого равен $\lambda_{из}$. Наружный диаметр теплоизоляции равен d_3 , а коэффициент теплоотдачи от изоляции к окружающей среде равен α_3 . Температура окружающей среды равна $t_{ж2}$. Геометрическая схема модели и обозначения приведены на рисунке 1.

Результаты исследования и их обсуждение

Работа по решению поставленной задачи осуществлялась в несколько этапов [4]. Сначала было изучено влияние наружного диаметра теплоизоляции d_3 на тепловой поток теплопередачей через теплоизолированную трубу. С этой целью использовали уравнение для линейного термического сопротивления многослойной цилиндрической стенки при стационарной теплопередаче.

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\lambda} + \frac{\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}{2\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_3 d_3} \quad (1)$$

здесь $R_1 = \frac{1}{\alpha_1 d_1}$ – линейное термическое сопротивление теплоотдачей от текучей среды к внутренней поверхности трубы; $R = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\lambda}$ – линейное термическое сопротивление теплопроводностью стенки трубы; $R_{из} = \frac{\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}{2\lambda_{из}}$ – линейное термическое сопротивление теплопроводностью изоляции; $R_3 = \frac{1}{\alpha_3 d_3}$ – линейное термическое сопротивление теплоотдачей от наружной поверхности теплоизоляции к окружающей среде.

Из уравнения (1) видно, что наружный диаметр теплоизоляции входит только лишь в два последних слагаемых линейного термического сопротивления всей модели. Отметим, что третье слагаемое уравнения (1) увеличивается с увеличением диаметра

изоляции d_3 по логарифмической кривой, а четвертое слагаемое уменьшается по гиперболе. Характер изменения линейных термических сопротивлений $R_{из}$ и R_3 при наружном диаметре трубы меньше критического диаметра изоляции показан на рис. 2.

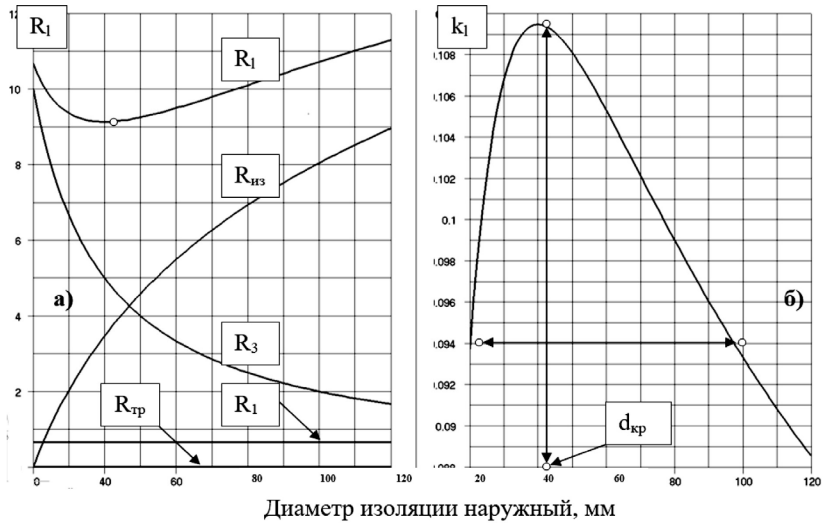


Рис. 2. Характеристики тепловой изоляции цилиндрической трубы при теплопередаче: а) линейные термические сопротивления, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; б) линейный коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$

Такое изменение параметров легко объяснить физически. По мере увеличения наружного диаметра d_3 теплоизоляции увеличивается её толщина и термическое сопротивление. Вместе с этим, увеличению диаметра d_3 теплоизоляции сопутствует увеличение её наружной поверхности и, следовательно, уменьшение термического сопротивления теплоотдачей в окружающую среду.

На следующем этапе был рассмотрен вопрос: изменяется ли линейное термическое сопротивление модели монотонно или же оно имеет экстремум при изменении диаметра теплоизоляции d_3 ? Определив производную линейного термического сопротивления модели как функцию от диаметра изоляции d_3 и приравняв её нулю

$$\frac{d(R_l)}{d(d_3)} = \frac{1}{2\lambda_{из}} \frac{d_2}{d_3} \frac{1}{d_2} - \frac{1}{\alpha_2 d_3^2} = \frac{1}{2\lambda_{из} d_3} - \frac{1}{\alpha_3 d_3^2} = 0 \quad (2)$$

получили, что при значении наружного диаметра теплоизоляции равном

$$d_3 = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_3}$$

линейное термическое сопротивление модели имеет экстремум.

Используя уравнение (2), можно установить, имеет ли термическое сопротивление модели в этой точке максимальное или же минимальное значение. Рассмотрим неравенства

$$\frac{d(R_l)}{d(d_3)} = \frac{1}{2\lambda_{из}} - \frac{1}{\alpha_3 d_3} < 0$$

$$\frac{d(R_l)}{d(d_3)} = \frac{1}{2\lambda_{из}} - \frac{1}{\alpha_3 d_3} > 0$$

Из первого неравенства следует, что при значении наружного диаметра теплоизоляции, удовлетворяющего условию

$$d_3 < \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_3},$$

производная от линейного термического сопротивления модели меньше нуля, а величина термического сопротивления уменьшается.

В том случае, когда выполняется условие

$$d_3 > \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_3},$$

производная от линейного термического сопротивления модели больше нуля и, следовательно, термическое сопротивление увеличивается.

Таким образом, когда наружный диаметр теплоизоляции удовлетворяет условию

$$d_3 = d_{кр} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_3}, \quad (3)$$

значение линейного термического сопротивления модели минимально.

Назовём это значение наружного диаметра теплоизоляции её критическим диаметром. Понятно, что минимальному линейному термическому сопротивлению модели соответствует максимальное

значение линейного коэффициента теплопередачи [рис. 2 а) и б)] и соответственно максимальные потери теплоты от трубопровода.

На рис. 2 приведены результаты расчёта теплоизолированной трубы с внутренним диаметром 15 мм и наружным диаметром 20 мм. Коэффициент теплоотдачи от текучей среды, соприкасающейся с внутренней поверхностью трубы, равен $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В качестве теплоизоляционного материала выбран асбест с коэффициентом теплопроводности $0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Коэффициент теплоотдачи от теплоизоляции в окружающую среду равен $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Диаметр изоляции в расчётах изменялся от 20 мм (изоляция отсутствует) до 120 мм (толщина изоляции равна 100 мм).

Видно, что по мере увеличения толщины асбеста, изолирующего трубу диаметром 20 мм, линейное термическое сопротивление модели уменьшается. Это уменьшение сопротивления происходит до толщины слоя теплоизоляции почти 80 мм (рис. 2а). Уменьшению термического сопротивления модели сопутствует увеличение коэффициента теплопередачи (рис. 2б) и соответственно увеличение тепловых потерь. Расчёт демонстрирует неудачный выбор материала теплоизоляции. Этот вывод иллюстрируется расчётами, представленными на рис. 3.

В одном из вариантов расчётов вновь для теплоизоляции выбран асбест, но изолируется труба вдвое большего диаметра ($\lambda_{\text{из}} = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и $d_2 = 40 \text{ мм}$). В этом случае по мере увеличения толщины изоляции увеличивается её термическое сопротивление и происходит непрерывное уменьшение потерь теплоты.

Во втором варианте для теплоизоляции трубопровода вдвое меньшего диаметра выбрана минеральная вата с меньшим коэффициентом теплопроводности ($\lambda_{\text{из}} = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и $d_2 = 20 \text{ мм}$). В этом случае по мере увеличения толщины изоляции увеличивается её термическое сопротивление и происходит непрерывное уменьшение потерь теплоты. Оба результата достигнуты правильным выбором пары параметров – диаметра изолируемой трубы и материала теплоизоляции.

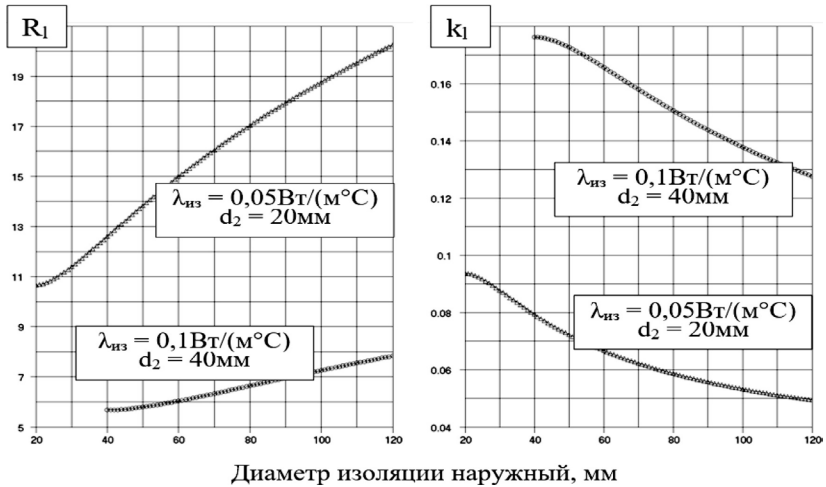


Рис. 3. Результаты расчётов эффективности теплоизоляции цилиндрического трубопровода при теплопередаче

Выполненный анализ позволяет сформулировать обобщённый подход к выбору теплоизоляции цилиндрической трубы. Разделим уравнение (3) для критического диаметра изоляции на наружный диаметр изолируемой трубы

$$d_0 = \frac{d_{кр}}{d_2} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_3 d_2}$$

В этом уравнении d_0 – критический диаметр теплоизоляции, отнесённый к наружному диаметру изолируемой цилиндрической трубы. Правильный выбор параметров, входящих в это уравнение соответствует условию

$$d_0 = \frac{d_{кр}}{d_2} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_3 d_2} \leq 1$$

Это выражение представляет математическую безразмерную форму интерпретации установленного выше факта: рациональный выбор изоляции возможен только лишь в том случае, когда увеличению её толщины сопутствует увеличение термического сопротивления всей модели. Эта закономерность должна начинаться с толщины теплоизоляции равной нулю.

Заключение

Выполненный анализ и проведенный расчёт позволяют сделать следующие выводы.

1. Критический диаметр изоляции зависит только лишь от коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции и коэффициента теплоотдачи в окружающую среду.

2. Изолировать трубу, наружный диаметр которой меньше критического диаметра изоляции, нерационально. Уменьшение тепловых потерь по мере увеличения толщины теплоизоляции наблюдается только для труб, наружный диаметр которых равен или же больше критического диаметра теплоизоляции.

3. Уменьшение критического диаметра теплоизоляции за счёт выбора теплоизоляционного материала с меньшим значением коэффициента теплопроводности позволяет уменьшить тепловые потери трубопроводов малого наружного диаметра.

Список литературы

1. Зотова В.А., Скачкова Е.Г., Феофанова Т.Д. Методические особенности применения теории подобия в расчете нестационарной одномерной линейной теплопроводности стержня // International Journal of Advanced Studies. 2022. Т. 12. № 1-2. С. 43-53.
2. Жулина Е.Г., Кальницкий Ф.Е. Перспективы применения автономных энергетических газотурбинных установок на транспорте // Вестник Мининского университета. 2013. № 1 (1). С. 18.
3. Кальницкий Ф.Е., Скачкова Е.Г. Расчёт теплопередачи вращающегося регенератора методом конечных разностей в критериальном виде // Социальные и технические сервисы: проблемы и пути развития. Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина. 2015. С. 205-209.
4. Папуткова Г.А., Головина И.В., Медведева Т.Ю. Современные подходы к систематизации информационных научно-методических ресурсов // Вестник Мининского университета. 2022. Т. 10. № 4.

References

1. Zotova V.A., Skachkova E.G., Feofanova T.D. Metodicheskie osobennosti primeneniya teorii podobiya v raschete nestacionarnoj odnomernoj linejnoy teploprovodnosti sterzhnya // International Journal of Advanced Studies. 2022. T. 12. № 1-2. S. 43-53. DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-1-2-43-53
2. ZHulina E.G., Kal'nickij F.E. Perspektivy primeneniya avtonomnyh energeticheskikh gazoturbinnnyh ustanovok na transporte // Vestnik Mininskogo universiteta. 2013. № 1 (1). S. 18.
3. Kal'nickij F.E., Skachkova E.G. Social'nye i tekhnicheskie servisy: problemy i puti razvitiya. Sbornik statej po materia-lam II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet im. K. Minina. 2015. S. 205-209.
4. Papatkova G.A., Golovina I.V., Medvedeva T.YU. Sovremennye podhody k sistematizacii informacionnyh nauchno-metodicheskikh resursov // Vestnik Mininskogo universiteta. 2022. T. 10. № 4.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Кутепова Любовь Ивановна, доцент, кандидат педагогических наук

Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина

ул. Челюскинцев, 9, г. Нижний Новгород, 603138, Российская Федерация

lubovkuteпова@mail.ru

Маркова Анастасия Дмитриевна, магистр

Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина

ул. Челюскинцев, 9, г. Нижний Новгород, 603138, Российская Федерация

na.ffan15@mail.ru

Скачкова Елена Геннадьевна, доцент, кандидат физико-математических наук

*Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина
ул. Челюскинцев, 9, г. Нижний Новгород, 603138, Российская Федерация
Zhulina-l@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Lyubov I. Kutepova, Associate Professor, Candidate of pedagogical Sciences

*Nizhny Novgorod State Pedagogical University of Kozma Minin
9, Chelyuskintsev Str., Nizhny Novgorod, 603138, Russian Federation*

lubovkutepova@mail.ru

SPIN-code: 6051-4279

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3175-4978>

Tatyana D. Markova, Magistr

*Nizhny Novgorod State Pedagogical University of Kozma Minin
9, Chelyuskintsev Str., Nizhny Novgorod, 603138, Russian Federation*

na.ffan15@mail.ru

Elena G. Skachkova, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

*Nizhny Novgorod State Pedagogical University of Kozma Minin
9, Chelyuskintsev Str., Nizhny Novgorod, 603138, Russian Federation*

Zhulina-l@yandex.ru

SPIN-code: 4690-7654

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2207-8733>

Поступила 10.02.2023

После рецензирования 25.02.2023

Принята 01.03.2023

Received 10.02.2023

Revised 25.02.2023

Accepted 01.03.2023