УДК 66.045.3 EDN CAGWTG

Анализ теплоизоляции технологических трубопроводов

Я.А. Куклина[1], А.А. Кабанов[1], Д.С. Бальзамов[2], В.В. Бронская[1*]

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия
[2]Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, д. 51 Казань, 420066, Россия

[*]E-mail: dweronika@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача выбора оптимальной толщины тепловой изоляции технологических трубопроводов в нефтеперерабатывающей промышленности. Ключевыми факторами, определяющими потерю тепла, являются температура среды, диаметр трубопровода, а также площадь поверхности теплообмена. В работе проанализировано понятие критического радиуса изоляции и выполнен его расчёт для трубы радиусом 79,5 мм, показавший, что при наружном радиусе больше критического увеличение толщины изоляции постепенно снижает тепловой поток. Для описания зависимости толщины изоляции от наружного диаметра труб рассмотрены аппроксимирующие функции: логарифмическая и гиперболическая. Показано, что выбор модели должен опираться не только на статистические метрики, но и на физическую обоснованность. По результатам анализа для двух материалов – навивных цилиндров ROCKWOOL 100 и PAROC Pro Section 100 – установлено, что в исследованном диапазоне диаметров обе модели обеспечивают высокое качество аппроксимации, однако за его пределами логарифмическая модель даёт завышенные значения для труб большого диаметра, тогда как гиперболическая ведёт себя адекватно.

Ключевые слова: теплоизоляция, технологический трубопровод, критический радиус, аппроксимация.

Для цитирования: Куклина, Я. А. Анализ теплоизоляции технологических трубопроводов / Я. А. Куклина, А. А. Кабанов, Д. С. Бальзамов, В. В. Бронская // Модернизация, Инновации, Прогресс (MIP ENGINEERING-VII-2026): материалы VII Всероссийской (национальной) научной конференции (Красноярск, 11–12 сентября 2026 г.). – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, 2026. – Т. 20. – С. 151-157. – EDN: CAGWTG.

Analysis of the thermal insulation of technological pipelines

Y.A. Kuklina[1], A.A. Kabanov[1], D.S. Balzamov[2], V.V. Bronskaya[1*]

[1]Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx, Kazan, 420015, Russia
[2]Kazan State Energy University, Krasnoselskaya St., 51, Kazan, 420066, Russia

[*]E-mail: dweronika@mail.ru

Abstract. The article examines the problem of selecting the optimal thickness of thermal insulation for process pipelines in the oil refining industry. The key factors determining heat loss are the medium temperature, the pipeline diameter, and the heat exchange surface area. The paper analyzes the concept of the critical insulation radius and calculates it for a pipe with a radius of 79.5 mm, showing that when the outer radius is greater than the critical one, an increase in the insulation thickness gradually reduces the heat flow. To describe the dependence of the insulation thickness on the outer diameter of the pipes, approximating functions are considered: logarithmic and hyperbolic. It has been shown that the choice of model should be based not only on statistical metrics but also on physical validity. Based on the analysis for two materials – spiral cylinders ROCKWOOL 100 and PAROC Pro Section 100 – it was established that within the studied diameter range, both models provide a high quality approximation; however, outside this range, the logarithmic model yields overestimated values for large-diameter pipes, while the hyperbolic model behaves adequately.

Keywords: thermal insulation, process pipeline, critical radius, approximation.

For citation: Kuklina, Y. A. Analysis of the thermal insulation of technological pipelines / Y. A. Kuklina, A. A. Kabanov, D. S. Balzamov, V. V. Bronskaya // Modernization, Innovations, Progress (MIP ENGINEERING-VII-2026): Proceedings of the VII All-Russian (National) Scientific Conference (Krasnoyarsk, September 11–12, 2026). – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Regional Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations, 2026. – Vol. 20. – P. 151-157. – EDN: CAGWTG.

1. Введение

В нефтеперерабатывающей промышленности технологические трубопроводы играют важную роль [1, 2]. По ним перемещаются сырье, полупродукты, целевые продукты, теплоносители. Температура эти потоков может быть самой разной: от криогенной до высокотемпературной [3-5]. Поддержание необходимой температуры по всей длине технологического трубопровода позволяет стабилизировать вязкостно-температурные свойства среды, а также предотвращает аварийные ситуации, связанные с фазовыми переходами.

Теплоизоляция трубопроводов – это защитный слой на наружной поверхности трубы, необходимый для снижения теплообмена между транспортируемой средой и окружающей средой. Также теплоизоляция позволяет поддерживать заданную технологическую температуру продукта при транспортировке на дальние расстояния, обеспечивает защиту персонала от ожогов при случайном контакте с горячими трубами за счёт снижения температуры наружного слоя изоляции до безопасных значений. Предотвращение конденсации на поверхности холодных трубопроводов и связанной с этим коррозии металла тоже является одной из главных задач теплоизоляции.

2. Постановка задачи

При проектировании технологических трубопроводов одним из ключевых этапов является определение оптимальной толщины теплоизоляции. Может показаться, что этот параметр главным образом зависит от температуры перекачиваемой среды, однако на практике решающую роль играют конструктивные параметры трубопровода, и в первую очередь его диаметр. С увеличением диаметра меняются условия теплообмена, а также соотношение между объёмом транспортируемого продукта и площадью поверхности, через которую происходят теплопотери. Именно это соотношение определяет, как именно толщина изоляции связана с типоразмером трубы.

3. Методы и материалы исследования

Критический радиус теплоизоляции – это наружный радиус изоляционного слоя (вокруг трубы или провода), начиная с которого дальнейшее увеличение толщины изоляции действительно приводит к снижению тепловых потерь, а не к их росту. Рассчитывается по формуле 1.

$$r_{\text{кр}} = \frac{\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2}, \quad (1)$$

где $\lambda_{из}$ – теплопроводность материала; α_2 – коэффициент теплоотдачи.

Рост тепловых потерь при радиусе теплоизоляции ниже критического чаще происходит у тонких труб и при высокой теплопроводности изоляции, так как теплоизоляция увеличивает поверхность теплоотдачи и эффект от этого становится выше эффекта термического сопротивления.

Рассчитаем критический радиус для трубы экспериментальной установки радиусом 79,5 мм. Входные данные: температура окружающей среды ($t_{ос}$) = – 5,2 °С, температура поверхности трубы $t_{пов}$ = 37,05 °С, норма теплового потока q = 32,16 Вт/м, теплопроводность материала $\lambda_{из}$ = 0,0522 Вт/(м°С).

$$r_{кр} = \frac{\lambda_{из}}{\alpha_2} = \frac{\lambda_{из} \cdot (t_{пов} - t_{ос})}{q} = \frac{0{,}0522 \cdot (37{,}05 + 5{,}2)}{32{,}16} = 0{,}0686 \text{ м} = 68{,}6 \text{ мм}$$

Поскольку наружный радиус трубы больше критического радиуса изоляции, то при увеличении толщины изоляции тепловой поток будет монотонно уменьшаться. Тогда, применение изоляции в этом случае термически обосновано и эффективно.

Для описания зависимостей толщины теплоизоляции от типоразмеров труб можно использовать аппроксимацию. Она подразумевает под собой создание простой математической модели на основе расчетных или экспериментальных данных. Такая модель позволяет интерполировать значения в промежуточных точках, экстраполировать их за пределы измеренного диапазона, а также использовать полученное аналитическое выражение в дальнейших вычислениях. Существуют различные аппроксимирующие функции:

- линейная – применима для прямо пропорциональных зависимостей;
- степенная – часто используется в теплообмене, где показатели степени зависят от режима течения и условий переноса тепла;
- логарифмическая – хорошо описывает процессы с затухающим ростом без горизонтальной асимптоты;
- экспоненциальная – моделирует насыщение с выходом на предел по экспоненте;
- гиперболическая – также стремится к асимптоте, но с гиперболическим характером приближения к ней;
- полиномиальная – обеспечивает высокую точность в изученном диапазоне, однако за его границами способна показывать нефизичное поведение вроде неограниченного роста или осцилляций.

Оценить, какая из аппроксимирующих функций лучше описывает один и тот же набор данных, можно по ряду критериев. Сначала нужно проанализировать статистические метрики. Выбранная модель обязана демонстрировать корректное асимптотическое поведение, то есть

при бесконечном росте диаметра трубы толщина изоляции должна выходить на конечное значение, а не стремиться к бесконечности. Таким образом, для итогового выбора, сначала отсеять все модели с нефизичным поведением, затем среди оставшихся сравнить статистические метрики, после принять наиболее простой и устойчивый за пределами исследованного диапазона.

В исследовании были рассмотрены два материала теплоизоляции.

Навивные цилиндры ROCKWOOL 100 – это изделия из каменной ваты на основе базальтовых пород для тепловой изоляции технологических трубопроводов. Их применяют в системах отопления, вентиляции, кондиционирования, водоснабжения и водоотведения. Материал изготовлен из гидрофобизированной каменной ваты на синтетическом связующем. Обладает группой горючести НГ (негорючие материалы). Температурный диапазон эксплуатации — от −180°C до +650 °C. Особенности изделия обусловлены технологией производства. Навивная методика обеспечивает высокую прочность и минимальное количество связующего в составе – волокна переплетаются между собой и сохраняют форму при резке изделия на отводы.

Навивные цилиндры PAROC Pro Section 100 – теплоизоляционные изделия из каменной ваты на основе базальтовых пород, предназначенные для изоляции трубопроводов (в т.ч. неметаллических) и воздуховодов круглого сечения в системах отопления, вентиляции, кондиционировании, водоснабжения, паропроводов, дымоходов и газопроводов. Температурный диапазон эксплуатации до +680°C. Изготавливаются методом навивки базальтовых волокон на сердечник нужной толщины, что обеспечивает высокую жёсткость и прочность изделия, сохранение формы при резке на отводы и минимальное содержание связующего в составе.

Основываясь на всём комплексе рассмотренных критериев из всего многообразия аппроксимирующих функций были отобраны два вида: логарифмическая и гиперболическая.

Основное различие между выбранными моделями аппроксимации становится заметным при расчетах диаметров, которые выходят за пределы исходных данных. Логарифмическая функция не имеет горизонтальной асимптоты, поэтому с ростом диаметра рассчитываемая толщина изоляции будет неограниченно увеличиваться. В свою очередь гиперболическая модель стремится к предельному значению, что соответствует реальному процессу. Для труб большого диаметра толщина изоляции будет выходить на постоянную величину, которая определяется условиями теплоотдачи.

4. Полученные результаты

Для оценки точности моделей аппроксимации были рассчитаны основные статистические показатели, а именно среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2). Результаты приведены в таблице 1 для материала навивные цилиндры ROCKWOOL 100 и в таблице 2 для материала навивные цилиндры PAROC Pro Section 100

Таблица 1. Сравнение метрик качества аппроксимации для материала навивные цилиндры ROCKWOOL 100.

Показатель	Логарифмическая модель	Гиперболическая модель
RMSE, м	0,001237	0,00164
MAE, м	0,000879	0,00143
R^2	0,983221	0,970527

Таблица 2. Сравнение метрик качества аппроксимации для материала навивные цилиндры PAROC Pro Section 100.

Показатель	Логарифмическая модель	Гиперболическая модель
RMSE, м	0,001224	0,001102
MAE, м	0,000934	0,00076
R^2	0,984805	0,987677

Для материала навивные цилиндры ROCKWOOL 100 выбранные модели обеспечивают высокое качество аппроксимации ($R^2 > 0,97$). Логарифмическая модель демонстрирует лучшие показатели по всем метрикам и ближе проходит к экспериментальным данным (рисунок 1, 2).

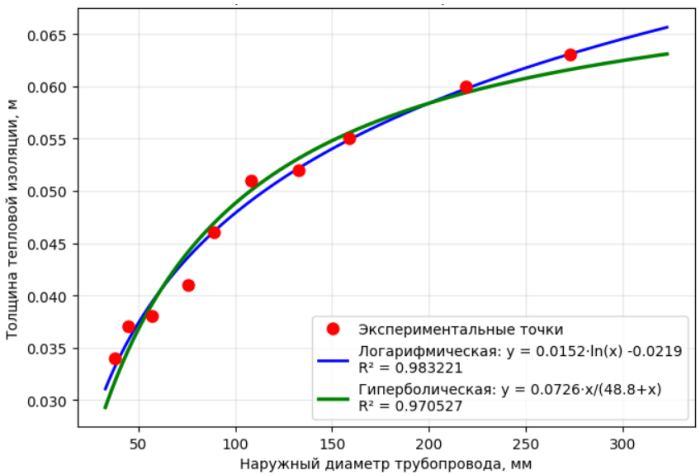

Рисунок 1. Сравнение моделей аппроксимации для материала навивные цилиндры ROCKWOOL 100 .

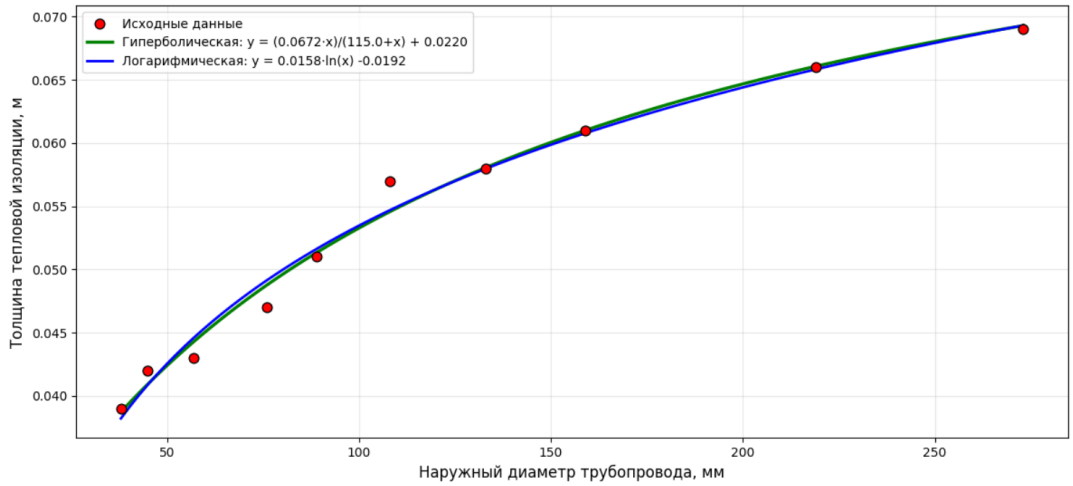

Рисунок 2. Сравнение моделей аппроксимации для материала навивные цилиндры PAROC Pro Section 100.

5. Выводы

В статье рассмотрена задача выбора оптимальной толщины теплоизоляции технологических трубопроводов в нефтеперерабатывающей промышленности. Показано, что ключевыми факторами теплопотерь являются температура транспортируемой среды, диаметр трубопровода и площадь поверхности теплообмена.

На примере трубы радиусом 79,5 мм рассчитан критический радиус теплоизоляции 68,6 мм. Поскольку наружный радиус трубы превышает критический, дальнейшее увеличение толщины изоляции приводит к монотонному снижению теплового потока, то есть применение изоляции термически обосновано и эффективно.

Для двух материалов (навивных цилиндров ROCKWOOL 100 и PAROC Pro Section 100) рассмотрены логарифмическая и гиперболическая аппроксимирующие модели зависимости толщины изоляции от наружного диаметра труб. В исследованном диапазоне диаметров обе модели обеспечивают высокое качество аппроксимации ($R^2 > 0,97$). Для ROCKWOOL 100 статистически лучшие показатели демонстрирует логарифмическая модель, для PAROC Pro Section 100 – гиперболическая.

Однако выбор модели должен опираться не только на статистические метрики (RMSE, MAE, R2R2), но и на физическую обоснованность. Логарифмическая модель не имеет горизонтальной асимптоты и при экстраполяции на большие диаметры даёт завышенные значения толщины изоляции. Гиперболическая модель стремится к предельному значению, что соответствует реальному процессу теплообмена.

Таким образом, в исследованном диапазоне диаметров могут использоваться обе модели, но при экстраполяции на трубы большого диаметра предпочтение следует отдавать

гиперболической модели. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании и выборе оптимальной толщины теплоизоляции технологических трубопроводов.

Список литературы

1. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. В 2-х кн. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. – 2-е изд. – М.: Химия, 1995. – 400 с
2. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. В 2-х кн. Часть 2. Массообменнные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. – 2-е изд. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
3. Бальзамов, Д. С. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена / Д. С. Бальзамов, В. В. Бронская // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 103-115. – https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-1-103-115. – EDN: GFVJOI.
4. Цифровое моделирование теплообменника / А. В. Овчаров, В. В. Бронская, Т. В. Игнашина [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 5. – С. 134-137. – EDN: TMGDMS.
5. Выбор оптимального типа теплоизоляционной конструкции на основе нейросетевого моделирования / И. Г. Ахметова, Е. Ю. Бальзамова, В. В. Бронская [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: 92- е заседание семинара, учрежденного при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах, Казань, 21-26 сентября 2020 года. Выпуск 71. Книга 2. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2020. – С. 186-190. – EDN: ZTWAET.