УДК 699.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРОШИВНЫХ МАТОВ МП-100 ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

INVESTIGATION OF THE THERMAL INSULATION MATERIAL OF MP-100 SEWING MATS FOR CHEMICAL PRODUCTION PIPELINES

Куклина Яна Андреевна
студент,
Казанский национальный исследовательский технологический университет

Кабанов Арсений Андреевич
студент,
Казанский национальный исследовательский технологический университет

Бальзамов Денис Сергеевич
доцент кафедры,
Казанский государственный энергетический университет

Аннотация. В работе рассматривается задача определения оптимальной толщины тепловой изоляции технологических трубопроводов в нефтеперерабатывающей промышленности. Обоснована ключевая роль теплоизоляции как фактора энергоэффективности и безопасности производства, а также показано, что выбор толщины изоляционного слоя определяется не только температурой транспортируемого продукта, но и геометрией объекта, в частности, диаметром трубы.

Ключевые слова: теплоизоляция, трубопроводы, нефтепереработка, толщина изоляции, аппроксимация, модель насыщения, логарифмическая модель, минераловатные маты МП-100, энергоэффективность, коэффициент детерминации.

Kuklina Yana Andreevna
Student,
Kazan National Research Technological University

Kabanov Arseniy Andreevich
Student,
Kazan National Research Technological University

Balzamov Denis Sergeevich
Docent of the department,
Kazan State Power Engineering University

Annotation. The paper considers the problem of determining the optimal thickness of thermal insulation of technological pipelines in the oil refining industry. The key role of thermal insulation as a factor of energy efficiency and production safety is substantiated, and it is also shown that the choice of insulation layer thickness is determined not only by the temperature of the transported product, but also by the geometry of the object, in particular, the diameter of the pipe.

Keywords: thermal insulation, pipelines, oil refining, insulation thickness, approximation, saturation model, logarithmic model, mineral wool mats MP-100, energy efficiency, coefficient of determination.

Введение

В современном мире, где вопросы энергоэффективности и ресурсосбережения выходят на первый план, понятие теплоизоляции приобретает ключевое значение[1,2]. Теплоизоляция – это комплекс материалов и технологических решений, направленных на снижение передачи тепла между объектами и окружающей средой.

В нефтепереработке теплоизоляция перестает быть просто вспомогательным элементом трубопроводов и оборудования – она становится неотъемлемой составляющей. Химическая технология здесь предъявляет особые требования: технологические потоки на установках перегонки, гидроочистки, риформинга проходят при высоких или, напротив, при низких температурах. Теплоизоляция поддерживает заданную температуру транспортируемой среды, предотвращает нежелательные фазовые переходы продукта, снижает теплопотери, влияющие на энергоэффективность производства и обеспечивает безопасность персонала.

Одним из ключевых этапов проектирования технологических трубопроводов в химической и нефтеперерабатывающей промышленности является определение оптимальной толщины тепловой изоляции. На первый взгляд может показаться, что эта величина зависит лишь от температуры транспортируемого продукта, однако практика проектирования показывает, что фундаментальное влияние здесь оказывает геометрия объекта, а именно – **диаметр трубы.** С увеличением диаметра меняются условия теплообмена, соотношение объема транспортируемого продукта к площади поверхности теплоотдачи, а следовательно, и характер зависимости толщины изоляционного слоя от типоразмера трубопровода.

Поставленные задачи

Для описания подобных зависимостей можно использовать методы аппроксимации – приближенные математические модели, позволяющие на основе экспериментальных или расчетных данных получить компактное аналитическое выражение. Такое выражение позволяет не только интерполировать значения в промежуточных точках, но и экстраполировать зависимость за пределы измеренного диапазона, а также использовать его в дальнейших расчетах без обращения к исходным табличным

данным. В зависимости от природы исследуемого процесса и характера распределения точек могут применяться различные виды аппроксимирующих функций.

Линейная функция используется для описания пропорциональных зависимостей, когда изменение одного параметра прямо пропорционально изменению другого. Степенная часто применяется для описания процессов теплообмена, где показатели степени определяются режимом течения и условиями переноса тепла. Логарифмическая характерна для процессов с замедлением роста – она хорошо описывает зависимости, в которых прирост постепенно снижается, но не имеет горизонтальной асимптоты. Экспоненциальная описывает процессы с насыщением, где выход на асимптотическое значение происходит по экспоненциальному закону. Гиперболическая – модель насыщения, также стремящаяся к пределу, но с гиперболическим характером выхода на асимптоту. Полиномиальная функция обеспечивает высокую точность в пределах исследованного диапазона, но за его пределами может давать нефизичное поведение, например, неограниченный рост или осцилляции.

Методы и материалы

В качестве теплоизоляционного материала могут быть использованы **прошивные маты МП-100** – минераловатные изделия на синтетическом связующем. Данный материал сохраняет свои свойства в диапазоне температур от –180 °С до +700 °С, что позволяет применять его как для криогенных, так и для высокотемпературных трубопроводов. По данным экспериментального исследования построена зависимость толщины тепловой изоляции от наружного диаметра трубопровода. Анализ исходного массива точек позволил выявить следующие особенности: зависимость носит нелинейный характер; с ростом диаметра трубы толщина изоляции увеличивается, однако темп прироста постепенно снижается; наблюдается тенденция к выходу на некоторое асимптотическое значение при больших диаметрах. Данные особенности предопределили выбор двух математических моделей, способных описать подобное поведение: логарифмическая функция и модель насыщения (гиперболического типа).

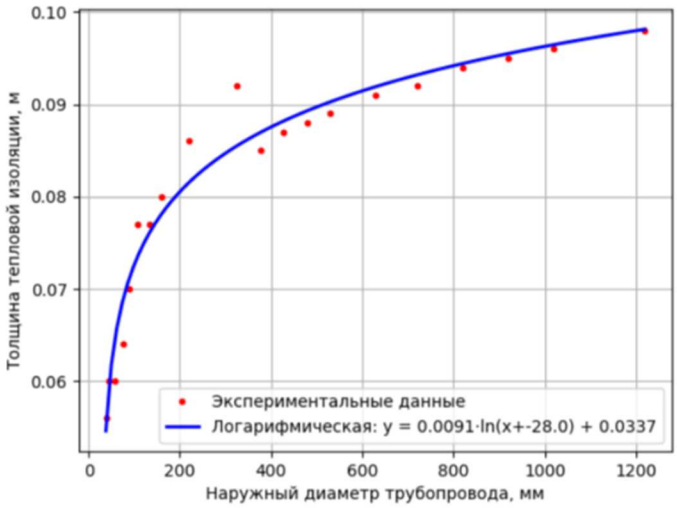

Рисунок 1 – Логарифмическая аппроксимация

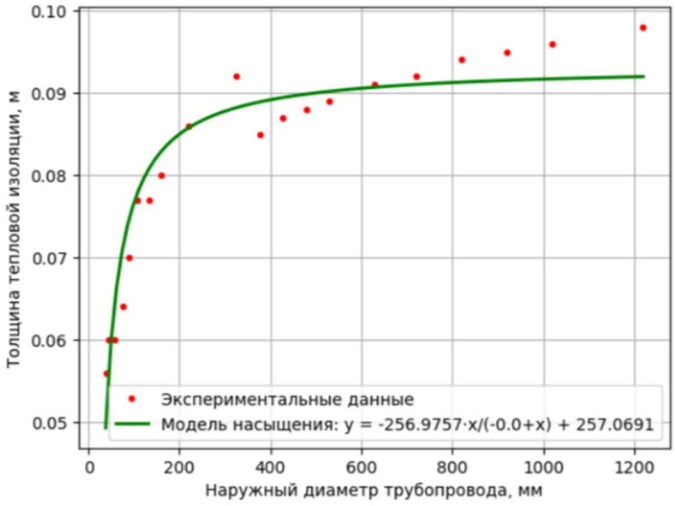

Рисунок 2 – Аппроксимация моделью насыщения

Полученные результаты

Для количественной оценки качества аппроксимации были рассчитаны основные статистические показатели: среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2) и максимальная абсолютная ошибка.

Таблица 1 – Метрики качества аппроксимации

Показатель	Логарифмическая модель	Модель насыщения
RMSE, м	0,003023	0,002780
MAE, м	0,002433	0,002345
R^2	0,9425	0,9514
Макс. абсолютная ошибка, м	0,007510	0,006961

Модель насыщения проходит ближе к экспериментальным данным, особенно в области малых и больших диаметров.

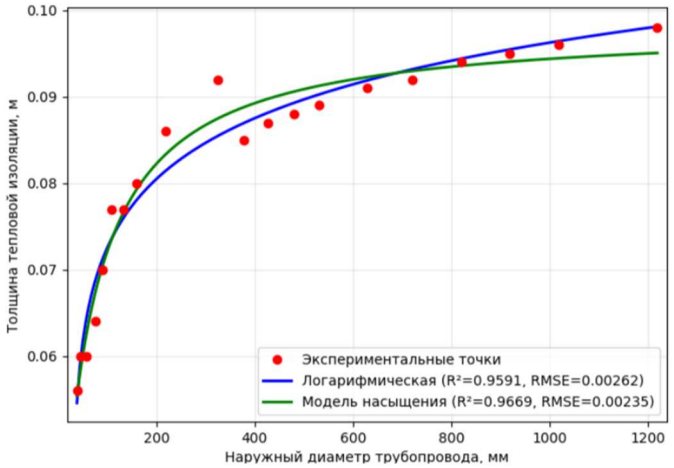

Рисунок 3 – Сравнение методов аппроксимации

Дополнительным преимуществом модели насыщения является возможность физической интерпретации ее параметров: асимптотическое значение соответствует предельной толщине изоляции для плоской стенки, а константа в знаменателе позволяет оценить критический диаметр.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенного анализа в качестве наиболее подходящей выбрана модель насыщения для аппроксимации толщины оптимальной тепловой изоляции от наружного диаметра трубопровода. Выбор обоснован более высоким показателем $R^2 > 0,95$. Логарифмическая модель, несмотря на хорошее соответствие данным в исследованном диапазоне, уступает по физической обоснованности и может приводить к завышению толщины изоляции при расчете труб большого диаметра.

Список литературы:

1. Выбор оптимального типа теплоизоляционной конструкции на основе нейросетевого моделирования / И.Г. Ахметова, Е.Ю. Бальзамова, В.В. Бронская [и др.] // В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 92-е заседание семинара учрежденного при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах. – Иркутск, 2020. – С. 186–190.
2. Бальзамов Д.С., Бронская В.В. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 103–115.

List of references:

1. Selection of the optimal type of thermal insulation structure based on neural network modeling / I.G. Akhmetova, E.Yu. Balzamova, V.V. Bronskaya [et al.] // In the collection: Methodological issues of studying the reliability of large energy systems. 92nd meeting of the seminar established at the Institute of Economics and Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. In 3 books. – Irkutsk, 2020. – P. 186–190.
2. Balzamov D.S., Bronskaya V.V. Improving the efficiency of thermal energy use at the heat-engineering section of ethylene production // News of higher educational institutions. Problems of energy. – 2025. – Vol. 27. – № 1. – P. 103–115.