

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15501576>

Нодирханова С.И., Хаджибаев А.Ш., Раджабова С. Култураева Ш. А.

Аннотация

В статье подробно рассматривается влияние термического сопротивления на работу теплообменников различного типа. Описаны физические основы формирования термического сопротивления, его структура и влияние на коэффициент теплопередачи. Приведены аналитические уравнения, инженерные расчёты, примеры и практические рекомендации. Предложены способы повышения тепловой эффективности путём снижения влияния загрязнений, использования новых конструктивных решений и современных материалов.

Ключевые слова

термическое сопротивление, теплообменник, коэффициент теплопередачи, загрязнение, теплопроводность, энергоэффективность, турбулизация, накипь.

Введение. Современные теплоэнергетические установки предъявляют высокие требования к эффективности систем теплопередачи. Повышение энергоэффективности является одной из ключевых задач в теплоэнергетике и смежных отраслях. Теплообменники — основное оборудование, предназначенное для передачи тепла между двумя или более средами. Однако их эффективность может значительно снижаться из-за наличия термического сопротивления, возникающего по различным причинам: неидеальных условий теплоотдачи, низкой теплопроводности конструкционных материалов, образования отложений на внутренних поверхностях. В настоящей работе исследуется влияние этих факторов на общее сопротивление теплопередаче, приводятся примеры расчётов и предлагаются инженерные методы повышения эффективности.

Теоретические основы термического сопротивления. Передача тепла в теплообменниках происходит за счёт сочетания трех процессов: теплопроводности, конвекции и иногда излучения. Теплопроводность представляет собой перенос тепла вследствие беспорядочного (теплого) движения микрочастиц, непосредственно соприкасающихся друг с другом.

Это движение может быть либо движением самих молекул (газы, капельные жидкости), либо колебанием атомов (в кристаллической решетке твердых тел), или диффузией свободных электронов (в металлах). В твердых телах теплопроводность является обычно основным видом распространения тепла.

Конвекцией называется перенос тепла вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов газа или жидкости. Перенос тепла возможен в условиях естественной, или свободной, конвекции, обусловленной разностью плотностей в различных точках объема жидкости (газа), возникающей вследствие разности температур в этих точках или в условиях вынужденной конвекции при принудительном движении всего объема жидкости, например в случае перемешивания ее мешалкой.

Тепловое излучение — это процесс распространения электромагнитных колебаний с различной длиной волн, обусловленный тепловым движением атомов или молекул излучающего тела. Все тела способны излучать энергию, которая поглощается другими телами и снова превращается в тепло. Таким образом, осуществляется лучистый теплообмен; он складывается из процессов лучеиспускания и луче-поглощения.

В процессе передачи тепла от горячего теплоносителя к холодному происходит прохождение теплового потока через несколько слоёв: пограничный слой жидкости, стенку теплообменника и слой загрязнений. Каждый из этих слоёв создаёт термическое сопротивление. Термические сопротивления стенки и загрязнений находят в зависимости от толщины собственно стенки и толщины слоя загрязнений (по практическим данным), а также от значений коэффициентов теплопроводности материала стенки и загрязнений. Суммарное термическое сопротивление может быть представлено как последовательное соединение отдельных сопротивлений.

$$R_{\text{общ}} = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_r} + \sum_1^n \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_x}$$

Здесь: $R_{\text{общ}}$ – общее термическое сопротивление теплопередачи, $\text{м}^2 \text{К}/\text{Вт}$;

$K = \frac{1}{R}$ – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{К}$

$\frac{1}{\alpha_r}, \frac{1}{\alpha_x}$ – коэффициенты теплоотдачи с обеих сторон;

δ – толщина стенки, м;

λ – теплопроводность материала, $\text{Вт}/\text{м К}$.

Источники термического сопротивления. Ключевыми источниками термического сопротивления являются:

- низкие коэффициенты теплоотдачи (особенно при ламинарных режимах);
- низкая теплопроводность материалов стенки;
- образование накипи, коррозии, биологических и иных отложений;
- неплотный контакт в разъёмных соединениях.

Каждый из этих факторов может существенно повлиять на итоговую тепловую эффективность устройства.

Анализ влияния термического сопротивления на производительность. Для количественной оценки влияния сопротивления рассмотрим пример расчета кожухотрубчатого теплообменника для нагрева 75% ной H_2SO_4 при следующих исходных данных:

Расход 75% ной H_2SO_4 $G_1 = 13$ кг/с

Начальная температура 75% ной H_2SO_4 $t_1 = 24$ °C

Конечная температура 75% ной H_2SO_4 $t_2 = 50$ °C

Давление греющего пара $P = 2,7$ атм $\approx 2,7$ кг τ /см².

Определим среднюю разность температур 75% ной H_2SO_4 :

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{24 + 50}{2} = 37$$
 °C

Находим физико-химических свойств 75% ной H_2SO_4 при 37°C:

$\rho_1 = 1653$ кг/м³ – плотность 75% ной H_2SO_4 ;

$c_1 = 1433$ Дж/кг · K – удельная теплоемкость 75% ной H_2SO_4 ;

$\lambda_1 = 0,279$ Вт/м · K – коэффициент теплопроводности 75% ной H_2SO_4 ;

$\mu_1 = 6,65 \cdot 10^{-3}$ – Па · с коэффициент динамической вязкости 75% ной H_2SO_4 .

Температура и физико-химические свойства греющего пара при давлении $P = 2,7$ кг τ /см²:

$T = 129$ °C – температура греющего пара;

$R = 2182 \cdot 10^3$ Ж/кг – удельная теплота парообразования греющего пара;

$\rho_2 = 935$ кг/м³ – плотность греющего пара;

$\mu_2 = 0,000212$ Па · с – коэффициент динамической вязкости греющего пара;

$\lambda_2 = 0,686$ Вт/м · K – коэффициент теплопроводности греющего пара

Тепловой расчет

Количество необходимой теплоты для нагрева 75% ной H_2SO_4 :

$$Q_1 = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_2 - t_1) = 13 \cdot 1433 \cdot (50 - 24) = 484354 \text{ Вт}$$

Расход сухого греющего пара с учетом 5% потерь теплоты:

$$G_2 = \frac{1,05 \cdot Q_1}{r} = \frac{1,05 \cdot 484354}{2182 \cdot 10^3} = 0,23 \text{ кг/с}$$

Определяем среднюю разность температур:

Температурная схема:

$$129^{\circ}\text{C} \rightarrow 129^{\circ}\text{C}$$

$$50^{\circ}\text{C} \leftarrow 24^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{м}}=79^{\circ}\text{C} \quad \Delta t_{\text{б}}=105^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{105}{79} = 1,32 < 2$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2} = \frac{105 + 79}{2} = 92^{\circ}\text{C}$$

Ориентировочный расчет

$K_{\text{оп}} = 120 \div 340 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ориентировочный коэффициент теплопередачи, (от греющего пара к жидкости).

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q}{K_{\text{оп}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{484354}{200 \cdot 92} = 26,32 \text{ м}^2$$

Из таблицы II.3 [7] выбираем следующий теплообменник:

$F = 31 \text{ м}^2$; $D = 400 \text{ мм}$, диаметр кожуха; $d = 25 \times 2,0 \text{ мм}$, диаметр труб; $L = 4 \text{ м}$ - длина труб; $n = 100$ штук; $z = 2$ - число ходов.

Уточненный расчет

75% ная H_2SO_4 движется в трубных каналах кожухотрубчатого теплообменника. Определим режим течения 75% ной H_2SO_4 в трубных каналах:

$$Re_1 = \frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot d \cdot \left(\frac{n}{z}\right) \cdot \mu_1} = \frac{4 \cdot 13}{3,14 \cdot 0,021 \cdot \left(\frac{100}{2}\right) \cdot 6,65 \cdot 10^{-3}} = 2372$$

Находим критерий Прандтля для 75% ной H_2SO_4 :

$$Pr_1 = \frac{c_1 \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{1433 \cdot 6,65 \cdot 10^{-3}}{0,279} = 34,15$$

Находим критерий Нуссельта для ламинарного режима по следующей формуле:

$$Nu_1 = 0,008 \cdot Re_1^{0,9} \cdot Pr_1^{0,43} = 0,008 \cdot 2372^{0,9} \cdot 34,15^{0,43} = 39,82$$

Коэффициент теплоотдачи для 75% ной H_2SO_4 :

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d} = \frac{39,82 \cdot 0,279}{0,021} = 529 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Греющий пар движется в межтрубном пространстве кожухотрубчатого теплообменника. Коэффициент теплоотдачи для греющего пара находим по следующей формуле:

$$\alpha_2 = 3,78 \cdot \lambda_2 \cdot \sqrt[3]{\rho_2^2 \cdot d \cdot \frac{n}{\mu_2} \cdot G_2} =$$

$$3,78 \cdot 0,686 \cdot \sqrt[3]{935^2 \cdot 0,025 \cdot \frac{100/2}{0,000212 \cdot 0,23}} = 7311 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Сумма термических сопротивлений:

$$\Sigma \frac{\delta}{\lambda} = r_{\text{загр}1} + \frac{\delta}{\lambda} + r_{\text{загр}2}$$

где: $\lambda = 46,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ – коэффициент теплопроводности для стальных труб; $r_{\text{загр}1} = \frac{1}{5800} \text{ м}^2 \cdot \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$ – загрязнения со стороны 75% ной H_2SO_4 ; $r_{\text{загр}2} = \frac{1}{5800} \text{ м}^2 \cdot \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$ – загрязнения со стороны греющего пара;

$\delta = 2 \text{ мм}$ - толщина стенки труб.

$$\Sigma \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{5800} = 0,00039 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Находим действительный коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{529} + 0,00039 + \frac{1}{7311}} = 414 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Действительная поверхность теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{484354}{414 \cdot 92} \approx 13 \text{ м}^2$$

Теперь рассчитаем по этим же данным сумму термических сопротивлений с накипью толщиной 1 мм:

$$\Sigma \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{5800} + \frac{0,001}{1,163} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{0,001}{1,163} + \frac{1}{5800} = 0,00215 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Находим действительный коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{529} + 0,00215 + \frac{1}{7311}} = 239 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Действительная поверхность теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{484354}{239 \cdot 92} \approx 22 \text{ м}^2$$

Снижение коэффициента теплопередачи

$$\frac{414 - 239}{414} \cdot 100\% = 42\%$$

Таким образом, эффективность снижается примерно на 42%. Для промышленных установок это может означать потери десятков и сотен киловатт мощности. Наиболее уязвимы к подобным эффектам

кожухотрубные аппараты с небольшой скоростью потока, где быстро развивается накипь и коррозия.

Также важно учитывать, что снижение теплопередачи увеличивает потребление энергии для поддержания заданных температурных режимов, повышая эксплуатационные расходы.

Методы снижения термического сопротивления. Для повышения эффективности теплообменников необходимо реализовывать следующие мероприятия:

- Увеличение скорости потока (переход к турбулентному режиму повышает α в 2–4 раза);
- Применение ребристых, рельефных или турбулизированных поверхностей;
- Использование высокотеплопроводных материалов: медь, алюминий, композиты с наполнителями;
- Регулярная очистка от накипи (механическая, химическая, гидродинамическая);
- Уменьшение толщины стенки при сохранении прочности;
- Оптимизация конструкции (например, пластинчатые теплообменники обеспечивают высокую α за счёт направленных завихрений потока).

Инженерные решения могут быть адаптированы под конкретные условия эксплуатации с учетом химического состава теплоносителя, режимов работы и типа теплообменника.

Практические рекомендации и примеры. В условиях эксплуатации теплообменников в тепловых сетях наиболее распространённым типом загрязнений является карбонатная накипь. Эксперименты показали, что слой накипи толщиной 1 мм может повысить термическое сопротивление на 0,0002–0,0005 К/Вт, что снижает эффективность до 30%. Для предотвращения необходимо внедрение систем автоматического контроля качества воды и предочистки. В промышленных установках рекомендуется применять теплообменники с модульной заменой пластин, что облегчает обслуживание. В энергетике эффективно зарекомендовали себя вихревые вставки и ультразвуковая очистка труб, позволяющая удалять отложения без демонтажа аппарата.

Заключение. Термическое сопротивление — важнейший параметр, влияющий на производительность теплообменных аппаратов. Оно

формируется множеством факторов: от свойств теплоносителей до степени загрязнения поверхностей. Понимание природы сопротивлений, их источников и последствий позволяет разработать эффективные меры по их минимизации. Для повышения эффективности систем теплоснабжения и промышленных теплотехнических установок необходимо учитывать термическое сопротивление на всех этапах: от проектирования до эксплуатации. Регулярный мониторинг, своевременная очистка, выбор

оптимальных материалов и конструкций — всё это повышает надёжность и экономичность работы систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарипов К. К. и др. ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ТЕПЛООБМЕННОЙ УСТАНОВКИ //Science and innovation. – 2024. – Т. 3. – №. Special Issue 15. – С. 513-515.
2. Холлманн К. Теплообменники: расчет, проектирование, эксплуатация. – СПб.: Профессия, 2010.
3. Левин А. М. Теплофизические основы проектирования теплообменников. – М.: МГТУ им. Баумана, 2017.
4. Annaev N. A. et al. Compacting solid waste from chemical industries //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2022. – Т. 2432. – №. 1.
5. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. М: Химия, 1983. 252с.
6. Мавлонов Э. Т. и др. ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ОТ ШАГА РАЗМЕЩЕНИЯ ТУРБУЛИЗАТОРОВ НА ТРУБЧАТО-РЕШЕТЧАТЫХ НАСАДКАХ АБСОРБЕРОВ //СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ. – 2018. – С. 246-250.
7. Xadjibayev A., Jobborova M., Erkinov A. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF U-SHAPED HEAT EXCHANGERS: A SCIENTIFIC ANALYSIS //International Journal of Artificial Intelligence. – 2025. – Т. 1. – №. 2. – С. 461-464.
8. Erkinov A., Xadjibayev A. USE OF ROTOR CLASSIFIERS IN THE POWDER SEPARATION PROCESS IN THE FOOD INDUSTRY //International Journal of Artificial Intelligence. – 2025. – Т. 1. – №. 2. – С. 458-460.
9. Исмоилов Р. И. и др. Регулирование реологических свойств буровых растворов, стабилизированных полиакрилатами и полисахаридом //Химическая безопасность. – 2020. – Т. 4. – №. 1. – С. 227-235.
10. Fozilbek S., Oybek I., Ozoda S. THE HEAT EXCHANGE PROCESS FOR OPTIMIZING PARAMETERS AND INCREASING PRODUCTION EFFICIENCY //Ethiopian International Journal of Multidisciplinary Research. – 2024. – Т. 11. – №. 04. – С. 451-459.
11. Шералиева О. А., Кадыров А. А. РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ПАВ ОГСЛ //Science and innovation. – 2024. – Т. 3. – №. Special Issue. – С. 152-153.

12. Ковалева А. А. и др. Направления переработки твердых продуктов пиролиза изношенных автомобильных шин, получаемых на установке ООО "РТС групп". – 2020.
13. Нурмухамедов А. М. и др. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕСТА ДЛЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ МУЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С НАЧИНКОЙ //AMERICAN JOURNAL OF EDUCATION AND LEARNING. – 2025. – Т. 3. – №. 4. – С. 176-181.
14. Мавлонов Э. Т. и др. ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ОТ ШАГА РАЗМЕЩЕНИЯ ТУРБУЛИЗАТОРОВ НА ТРУБЧАТО-РЕШЕТЧАТЫХ НАСАДКАХ АБСОРБЕРОВ //СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ. – 2018. – С. 246-250.
15. Рахимжанова Ш., Маназарова Х., Нодирхонова С. Исследование процесса подогрева нефтегазоконденсатной смеси парами легкой нефти в теплообменном аппарате 10E04 //Зелёная химия и устойчивое развитие. – 2023. – Т. 1. – №. 1. – С. 120-122.