

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Глотов Валерий Андреевич,

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: valera.glotov.2002@mail.ru

Глотов Анатолий Андреевич,

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: glotovanatolii@gmail.com

ПОДБОР МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Shcherbin S.A., Glotov V.A., Glotov A.A.

SELECTION OF MATERIAL AND THICKNESS OF THERMAL INSULATION

Аннотация. Рассмотрены методики подбора материала, применяемого в качестве тепловой изоляции, и его толщины.

Ключевые слова: тепловая изоляция, термическое сопротивление, тепловые потери.

Abstract. The methods of selecting the material used as thermal insulation and its thickness are considered.

Keywords: thermal insulation, thermal resistance, heat loss.

Тепловая изоляция находит широкое применение в нефтехимической промышленности для уменьшения тепловых потерь, что является важным экономическим фактором при проектировании технологических аппаратов и трубопроводов. Кроме того, использование теплоизоляции способствует надежному проведению адиабатных, изотермических, экзотермических и других специфических химико-технологических процессов, а также защите оборудования от коррозии за счет предотвращения образования конденсата.

Не менее важным фактором является обеспечение безопасных условий труда для рабочего персонала. В соответствии с данными таблицы 1 [1], температура наружной поверхности тепловой изоляции для аппаратов, расположенных в рабочей или обслуживаемой зонах помещений, не должна превышать 35-55 °С. Температура наружной поверхности тепловой изоляции оборудования, расположенного на открытом воздухе в рабочей или обслуживаемой зоне, должна быть не выше 60 °С. Для трубопроводов, расположенных за пределами рабочей или обслуживаемой зоны, температура наружной поверхности тепловой изоляции не должна превышать температурных пределов применения материалов покровного слоя, и не должна быть выше 75 °С.

К материалам для тепловой изоляции предъявляются следующие требования: значение коэффициента теплопроводности не должно превышать 0,12 Вт/(м·К) при 25°С; малая плотность (менее 400 кг/м³) за счет высокой пористости; низкая гигроскопичность; высокая удельная массовая теплоемкость (не менее 800 Дж/(кг·К)); термостойкость, механическая прочность, достаточная пластичность; пожаробезопасность (при горении материала не должны выде-

ляться вредные и ядовитые вещества); отсутствие собственного запаха и невосприимчивость к посторонним запахам; доступность, дешевизна и долговечность материала.

Таблица 1

Допускаемая температура изолируемых поверхностей,
расположенных в рабочей или обслуживаемой зонах помещений

Температура технологической среды в аппарате (трубопроводе), °С	Температура наружной поверхности тепловой изоляции, °С, не более
выше 500 °С	55
от 150 до 500 °С	45
150 °С и ниже	40
температура вспышки паров ниже 45 °С	35

В работе [2] рассмотрены основные положения, которые следует учитывать при подборе материала тепловой изоляции. Показано, что при подборе материала для тепловой изоляции следует определить ее критический диаметр $(d_T)_{кр}$ и проверить условие целесообразности применения выбранного материала:

$$(d_T)_{кр} = \frac{2\lambda_T}{\alpha_0}; \quad (1)$$

$$(d_T)_{кр} \leq d_n, \quad (2)$$

где λ_T – коэффициент теплопроводности материала тепловой изоляции, Вт/(м·К); α_0 – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде (атмосферному воздуху), Вт/(м²К); d_n – наружный диаметр изолируемой поверхности, м.

Критический диаметр тепловой изоляции соответствует минимальному значению полного термического сопротивления или, другими словами, максимальным потерям теплоты через наружную поверхность. Если условие (2) не выполняется, то следует выбрать другой материал с меньшим коэффициентом теплопроводности.

Известно, что увеличение толщины теплоизоляционного слоя не приводит к пропорциональному уменьшению тепловых потерь, так как в этом случае помимо увеличения термического сопротивления теплопередачи стенки возрастает площадь наружной поверхности теплообмена с окружающей средой [3].

В нормативной литературе [4] приводятся значения предельной толщины теплоизоляционных конструкций для оборудования и трубопроводов в зависимости от диаметра изолируемой поверхности и температуры. В случае, если расчетная толщина изоляции больше предельной, следует принимать более эффективный теплоизоляционный материал и ограничиться предельной толщиной тепловой изоляции, если это допустимо по условиям технологического

процесса.

В настоящей работе рассмотрен подход к определению оптимальной толщины тепловой изоляции из условия минимальных приведенных затрат.

Представим приведенные годовые затраты на устройство 1 м² тепловой изоляции Z , руб/(м²·год), в следующем виде:

$$Z = EK + \Xi, \quad (3)$$

где K – капитальные затраты, руб/м²; E – коэффициент эффективности капиталовложений, год⁻¹; Ξ – эксплуатационные затраты, руб/(м²·год).

Капитальные затраты на 1 м² теплоизолированной поверхности в наибольшей степени определяются стоимостью материала, которая, в свою очередь, зависит от необходимого термического сопротивления R_T , м²К/Вт, слоя теплоизоляции, обеспечивающего допустимую величину потерь теплоты:

$$K = \delta_T C_T = R_T \lambda_T C_T, \quad (4)$$

где δ_T – толщина слоя материала теплоизоляции, м; C_T – стоимость материала, руб/м³; $R_T = \delta_T / \lambda_T$ – термическое сопротивление слоя тепловой изоляции, м²К/Вт.

Эксплуатационные затраты определяются стоимостью тепловой энергии, теряемой через 1 м² теплоизолированной поверхности в течение 1 года:

$$\Xi = \frac{1}{R} (t_{cp} - t_0) \tau C_Q, \quad (5)$$

где t_{cp} и t_0 – температуры горячей среды и окружающего воздуха, °С; τ – продолжительность работы за год, ч/год; C_Q – удельная стоимость тепловой энергии, руб/(Вт·ч); R – полное термическое сопротивление многослойной теплоизолированной стенки, м²К/Вт:

$$R = R_{cp} + \sum_{i=1}^n R_i + R_T + R_0, \quad (6)$$

где $R_{cp} = 1/\alpha_{cp}$ – термическое сопротивление теплоотдачи от горячей среды к внутренней поверхности стенки, м²К/Вт; α_{cp} – коэффициент теплоотдачи от среды к стенке, Вт/(м²К); R_i – термическое сопротивление теплопроводности i -го слоя стенки, м²К/Вт; n – количество слоев стенки; R_T – термическое сопротивление теплопроводности слоя тепловой изоляции, м²К/Вт; $R_0 = 1/\alpha_0$ – термическое сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности стенки к окружающему воздуху, м²К/Вт.

Запишем выражение (6) в виде

$$R = \sum_{j=1}^m R_j + R_T, \quad (7)$$

где $\sum_{j=1}^m R_j$ – сумма термических сопротивлений теплоотдачи и теплопроводности всех слоев стенки, кроме слоя теплоизоляции, м²К/Вт.

Тогда

$$\Xi = \frac{(t_{cp} - t_0)\tau C_Q}{\sum_{j=1}^m R_j + R_T}, \quad (8)$$

и приведенные затраты на тепловую изоляцию составят:

$$Z = E R_T \lambda_T C_T + \frac{(t_{cp} - t_0)\tau C_Q}{\sum_{j=1}^m R_j + R_T}. \quad (9)$$

Определим первую производную функции (9) по R_T , приравняем ее к нулю и выразим оптимальное значение термического сопротивления теплоизоляции $(R_T)_{opt}$, при котором затраты будут минимальными (при условии, что вторая производная функции (9) положительная):

$$\frac{d(Z)}{d(R_T)} = E \lambda_T C_T - \frac{(t_{cp} - t_0)\tau C_Q}{(\sum_{j=1}^m R_j + R_T)^2} = 0; \quad (10)$$

$$(R_T)_{opt} = \sqrt{\frac{(t_{cp} - t_0)\tau C_Q}{E \lambda_T C_T} - \sum_{j=1}^m R_j}. \quad (11)$$

Проверим выполнение условия минимума функции:

$$\frac{d^2(Z)}{d(R_T)^2} > 0; \quad (12)$$

$$\frac{d^2(Z)}{d(R_T)^2} = \frac{2(t_{cp} - t_0)\tau C_Q}{(\sum_{j=1}^m R_j + R_T)^3} > 0, \quad (13)$$

условие выполняется.

Используя (11), выразим оптимальную толщину слоя тепловой изоляции:

$$(\delta_T)_{opt} = (R_T)_{opt} \lambda_T = \left(\sqrt{\frac{(t_{cp} - t_0)\tau C_Q}{E \lambda_T C_T} - \sum_{j=1}^m R_j} \right) \lambda_T. \quad (14)$$

Использование выражений (2) и (14) позволяет обоснованно выбрать материал для устройства тепловой изоляции и его толщину.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 60.13330.2012. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. М.: Минрегион России, 2012.
2. Щербин С.А., Глотов В.А. Подбор материала для устройства тепловой изоляции // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. Т. 1. № 8. С. 103-104.
3. Варфоломеев Б.Г., Карасев В.В. Тепловая изоляция аппаратов. М.: МИТХТ, 2000. 61 с.
4. СП 61.13330.2012. Свод правил. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. М.: Минрегион России, 2012.