



The matters of determination of rational parameters of isolation coverings for heat aggregates, functioning in metallurgical, machine-building and industrial complexes, are examined in the article. Recommendations on choice of geometrical parameters of isolation of complicated form, providing obtaining of energy saving effect at functioning of high-temperature aggregates, are offered.

Е. В. ТОРОПОВ, Южно-Уральский государственный университет,
Д. Н. МАКАРОВ, ОАО «ЧМК»,
Е. Е. ТОРОПОВ, ООО «Grundfos», Челябинск

УДК 669.046

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ УСЛОЖНЕННОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ МЕТАЛЛУРГИИ

Надежность и эффективность работы тепловых агрегатов и устройств в значительной степени определяются функционированием элементов ограждений – огнеупорной футеровки, теплоизоляционного слоя, устройств компенсации термических напряжений. Управление потоками теплоты в элементах ограждения, и в первую очередь в теплоизоляционном слое, позволяет осуществлять рациональные температурно-тепловые режимы, организацию тепловых потоков в определенном месте в необходимом направлении с целью снижения тепловых потерь. Чтобы достигнуть цели, необходимо четкое математическое описание температурно-теплого состояния элементов сложной формы, поэтому существенный интерес представляют схемы, позволяющие найти оптимальные решения научно-технических задач.

Линейная плотность теплового потока q_l , Вт/м, через цилиндрический элемент изоляции с размерами $r_{вн}$ и r_n , м, при изотропной теплопроводности материала с теплопроводностью $\lambda_{из}$, Вт/(м·°С), рассчитывается по формуле:

$$q_l = 2\pi\Delta t/R_l, \quad (1)$$

где $\Delta t = t_{ж.вн} - t_{ж.н}$ – разность температур жидкости внутри канала и снаружи, °С; R_l – полное линейное термическое сопротивление теплопередачи, м·°С/Вт, которое определяется зависимостью:

$$R_l = \frac{1}{r_{вн}\alpha_{вн}} + \frac{1}{\lambda_{из}} \ln \frac{r_n}{r_{вн}} + \frac{1}{r_n\alpha_n}, \quad (2)$$

где $\alpha_{вн}$, α_n – коэффициенты теплоотдачи на внутреннюю поверхность изоляционного слоя и от наружной поверхности, Вт/(м²·°С).

Структура функции R_l такова, что при увеличении толщины слоя изоляции с повышением r_n термическое сопротивление теплопроводности изоляционного слоя $R_{mn} = (1/\lambda_{из}) \ln(r_n/r_{вн})$ возрастает

по логарифмической кривой, а термическое сопротивление теплоотдачи во внешнюю среду $R_{mn} = (1/r_n\alpha_{вн})$ убывает по гиперболическому закону при неизменной величине термического сопротивления теплоотдачи на внутреннюю поверхность $R_{men} = (1/r_{вн}\alpha_{вн}) = \text{const}$. Это свидетельствует о возможности существования экстремальной зависимости $R_l = f(r_n)$. Применив необходимое условие существования экстремума функции $\partial f(r_n)/\partial r_n = 0$, найдем $r_n^3 = \lambda_{из}/\alpha_n$; применив достаточное условие, найдем $\partial^2 f(r_n)/\partial r_n^2 > 0$, значит, в точке $r_n = r_n^3$ функция $R_l = f(r_n)$ имеет минимум.

Увеличение толщины изоляции в области $r_n < r_n^3$ будет приводить к снижению термического сопротивления и увеличению теплотерь согласно (1) и только переход в область $r_n > r_n^3$ приведет при увеличении толщины слоя изоляции к снижению тепловых потерь.

При конструировании тепловой изоляции следует обеспечить расположение наружного размера теплоизоляционного покрытия в области $r_n > r_n^3$, причем, как отмечалось, r_n^3 зависит от условий теплоотдачи от наружной поверхности теплоизоляционного покрытия в окружающую среду α_2 , Вт/(м²·°С), и коэффициента теплопроводности материала изоляции $\lambda_{из}$, Вт/(м·°С).

Эти соотношения позволяют построить номограмму для определения рационального сочетания термического сопротивления и размера изоляционного покрытия для заданных условий теплоотдачи в окружающую среду $\alpha_n = \text{const}$ (рис. 1). График на рис. 1 охватывает все материалы с

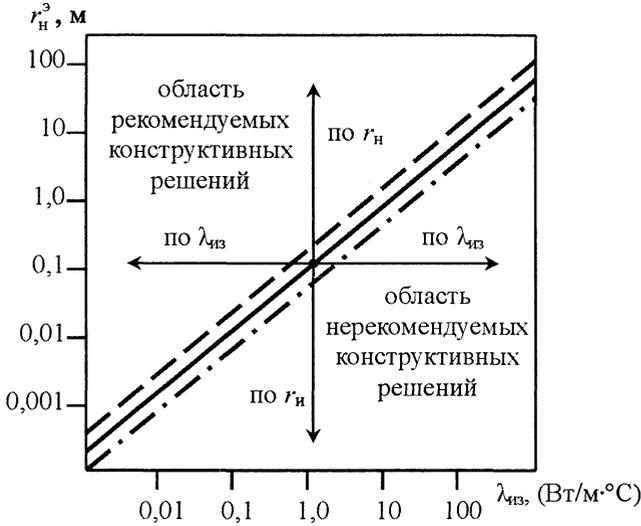


Рис. 1. Область рекомендуемых параметров при конструировании цилиндрической тепловой изоляции наружным радиусом r_n при: — — — $\alpha_n = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; — — — — — 10 ; - · - · - · - $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

диапазонами изменения теплопроводности: $\lambda < 0,25$ — теплоизоляционные материалы, $0,25 < \lambda < 0,30$ — строительные и керамические материалы, $\lambda > 0,30$ — металлы и сплавы, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Из рисунка видно, что теплоизоляционным материалам соответствует экстремальный наружный размер $r_n^3 = 0,050 - 0,015 \text{ м}$ и менее, строительным — $0,260 - 0,067$, металлам — $8,0 - 2,7 \text{ м}$.

С применением металлических оболочек без покрытий их термическое сопротивление теплопроводности незначительно и поэтому увеличение толщины металлической стенки приведет лишь к повышению тепловых потерь при фиксированных температурах поверхностей и коэффициентах теплоотдачи в окружающую среду.

Применение изоляционных и строительных материалов в качестве покрытий вызывает необходимость при первичном расчете получить $r_n^3 < r_n$, тогда при последующем увеличении толщины покрытия можно увеличить полное линейное термическое сопротивление теплопередачи и снизить теплотери до требуемых нормативных величин [1]. Если при первичном расчете окажется, что $r_n < r_n^3$, это означает, что материал изоляционного покрытия не подходит для рассматриваемого технического случая, его необходимо заменить на менее теплопроводный с тем, чтобы выйти в область $r_n^3 < r_n$.

Если изоляция накладывается на металлическую поверхность, то термическое сопротивление металла можно не учитывать из-за сравнительно невысокого его значения. Но при расположении изоляции внутри металлической оболочки, напри-

мер при транспортировке высокотемпературных сред при избыточном давлении, определение $r_{вн}^3$ по изложенной выше методике приводит к выражению $r_{вн}^3 = \lambda_{из} / \alpha_{вн}$, т.е. любое положительное значение $r_{вн}$ будет больше экстремального. Это означает, что увеличение толщины изоляционного покрытия внутри конструкции при сохранении условий теплоотдачи на внутреннюю поверхность будет давать положительный эффект в виде сокращения тепловых потерь.

Для сферической формы изоляции уравнения полного теплового потока

$$Q = 4\pi\Delta t/R_{сф} \quad (3)$$

и полного термического сопротивления теплопередачи $R_{сф}$, $\text{°C}/\text{Вт}$:

$$R_{сф} = \frac{1}{\alpha_{вн}r_{вн}^2} + \frac{1}{\lambda_{из}} \left(\frac{1}{r_{вн}} - \frac{1}{r_{ин}} \right) + \frac{1}{\alpha_{ин}r_{ин}^2} \quad (4)$$

дают при применении методов существования необходимого и достаточного условий существования экстремума зависимость $r_n^3 = \lambda_{из} / \alpha_n$, что позволяет использовать рис. 1 при замене $\lambda_{из}$ на $\lambda_{сф} = 2\lambda_{из}$.

При разработке изоляционного покрытия для тепловых агрегатов и устройств различного технологического назначения применяются поверхности усложненных форм — многоугольники, эллипсоиды вращения, конуса и др. Для расчета термического сопротивления теплопроводности покрытий, ограниченных поверхностями усложненных форм, может быть применен универсальный прием, который можно назвать «методом источников — принципом наложений» [2], где тепловоспринимающая и теплоотдающая поверхности заменяются суммой точечных источников и стоков теплоты; создаваемые ими температурные поля для получения результирующего температурного поля суммируются по принципу суперпозиции. Из полученных этим методом термических сопротивлений по необходимому и достаточному признакам находится экстремальное значение толщины изоляционного покрытия. Ниже приведены результаты исследований изоляционных покрытий усложненных форм, полученные этим методом.

При ограничении наружной поверхности изоляции плоскостями, составляющими в сечении квадрат со стороной a при цилиндрической внутренней поверхности радиусом $r_{вн}$, термическое сопротивление теплопередачи R_p , $\text{м} \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, рассчитывается по формуле:

$$R_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{вн}r_{вн}} + \frac{1}{\lambda_{из}} \ln \frac{0,54a}{r_{вн}} + \frac{\pi}{2\alpha_{ин}a} \right) \quad (5)$$

при экстремальном значении наружной стороны квадрата $a^3 = 1,57\lambda_{из}/\alpha_n$ и $\lambda_{кв} = 1,57\lambda_{из}$.

Если наружная поверхность изоляции представляет собой многоугольник, то экстремальное значение толщины теплоизоляционного покрытия определяется по радиусу окружности r_n , описывающей многоугольник. В этом случае также $r_n^3 = 2\lambda_{из}/\alpha_n$ при определении полного линейного термического сопротивления теплопередачи R_l :

$$R_l = \frac{1}{\alpha_{вн} r_{вн}} + \frac{1}{\lambda_{из}} \times \left(\ln \frac{r_n}{r_{вн}} - 0,378n^2 + 3,842n - 10,402 \right) + \frac{1}{\alpha_{н} r_n}. \quad (6)$$

При применении эллиптической цилиндрической изоляции критический размер изоляции определяется суммой большой c и малой d полуосей наружного эллипса $(c+d)^3 = 2\lambda_{из}/\alpha_{вн}$. Форма внутренней поверхности изоляции не играет роли — это может быть также эллиптический или круговой цилиндр, или пластина. Эта же зависимость справедлива при расчете изоляции в форме эллипсоида вращения, что применяется при изоляции эллиптических крышек и днищ.

В том случае, если изоляция изготовлена в форме натрубной обмуровки с шагом труб S и толщиной слоя изоляции h , экстремального значения h найти не удастся. При увеличении h теплотери монотонно снижаются, при этом рабочая область определяется неравенством $h > (S/2\pi - \lambda_{из}/\alpha_n)$.

При сочетании внутренней цилиндрической поверхности с плоской наружной экстремальное значение толщины стенки δ^3 , подсчитанное по минимальному расстоянию между этими поверхностями, можно вычислить по графику, приведенному на рис. 2.

Применение тепловой изоляции в форме двух прямоугольников и плоской поверхности не дает оптимальных значений толщины слоя изоляции — с увеличением толщины изоляции теплотери монотонно снижаются. Тепловая изоляция на элементах конической формы рассчитывается по графику рис. 1 для большего и меньшего наружных радиусов с переходным участком по образующей конуса. При сочетании внешней плоской и внутренней цилиндрической поверхностей экстремальное значение расстояния между ними δ^3 определяется по графику рис. 2.

Применение тепловой изоляции в форме несоосных цилиндров не позволяет использовать аналитическое решение. В каждом конкретном случае требуется численный анализ относительно

r_n^3 уравнения

$$r_n [\alpha_n^2 r_n^4 - 4\alpha_n^2 r_n^3 r_b + (4\alpha_n^2 - \alpha_n^2 S^2) r_n^2 + 4\alpha_n^2 r_n r_b^3 + (\alpha_n^2 r_b^2 S^2 - \alpha_n^2 r_b^4)] - r_b^2 = 0. \quad (7)$$

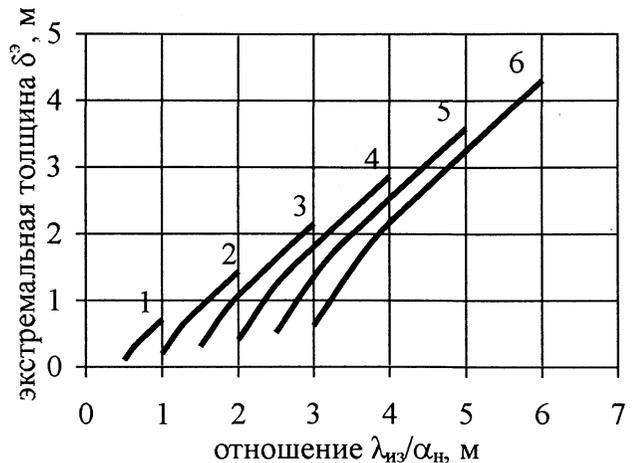


Рис. 2. Экстремальная толщина стенки, ограниченной внутренней цилиндрической и внешней плоской поверхностями $\delta_{кр}$ в функции отношения λ/α_n , м, при: 1 — $r_b = 0,25$ м; 2 — 0,50; 3 — 0,75; 4 — 1,00; 5 — 1,25; 6 — 1,50 м

Пользуясь приведенными здесь соображениями, можно легко найти область рабочих значений размера изоляции и для других частных случаев; определенно решается вопрос о существовании критического размера изоляционного слоя над заглубленными протяженными тепловыделяющими элементами. Так, для слоя изоляции над прямоугольным протяженным тепловыделяющим элементом размером ab с толщиной слоя h линейное термическое сопротивление пропорционально толщине слоя, поэтому функция, описывающая изменение сопротивления, не имеет экстремума.

При рассмотрении изоляции других геометрических форм необходимо стремиться представить рассматриваемую форму как сочетание изученных выше геометрических форм. Так, изоляция трубопровода подачи и подогрева жидкого топлива при наличии одного парового спутника может быть представлена сочетанием двух цилиндров разного диаметра, соединенных плоскими поверхностями. Решением для этого случая может быть расчет r^3 по наружному радиусу меньшего цилиндра с плавным или ступенчатым переходом к цилиндрической поверхности большего радиуса.

Применение предлагаемых рекомендаций обеспечивает получение толщины изоляции усложненной формы для рассмотренных случаев, соответствующей достижению энергосберегающего эффекта в рабочей области геометрических параметров.

Литература

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1968.
2. Горопов Е.Е. Выбор оптимальной толщины слоя изоляции сложной формы: Учеб. пособ. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.