УДК 536.212.3

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

В.Ф. ШВЕДОВ, технический директор компании «Ролс К-Флекс»

В предыдущей статье* были рассмотрены основные теплоизоляционные материалы для низкотемпературных систем, работающих при атмосферном давлении. Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность их работы, является теплопроводность. Для того чтобы понять, от чего зависит этот показатель, необходимо подробнее остановиться на процессе теплообмена в газонаполненных системах, каковыми и являются теплоизоляционные материалы. Передача теплоты в таких системах осуществляется посредством:

✓ кондуктивной теплопроводности твердого скелета, образующего пористую структуру материала;

✓ кондуктивной теплопроводности газа, находящегося в капиллярах или ячейках пор;

✓ излучения между стенками пор (радиационная теплопроводность);

✓ конвекции вследствие перемещения газа в пористой структуре изоляции.

Для упрощения тепловых расчетов на практике используется зависимость, основанная на законе Фурье, справедливая, строго говоря, лишь для твердых тел, в которых перенос тепла осуществляется только благодаря кондуктивной теплопроводности. Коэффициент теплопроводности изоляционных материалов (эффективная теплопроводность) является суммарной характеристикой:

$$\lambda_{эф} = \lambda_q + \lambda_р + \lambda_к,$$

где λ_q – суммарная кондуктивная теплопроводность твердого скелета и газа внутри пор;

$\lambda_р$ – радиационная теплопроводность;

$\lambda_к$ – конвективная теплопроводность.

Таким образом, эффективная теплопроводность является сложной функцией, зависящей от многих факторов: температуры, давления газа в порах, размера пор, степени черноты стенок капилляров и ячеек и др., оказывающих различное влияние на величину коэффициента теплопроводности.

Для низкотемпературной теплоизоляции необходимо также учесть влияние влагосодержания материала. Для этого в величину теплопроводности материала в сухом состоянии вводят отдельно рассчитываемые поправочные коэффициент или добавки.

Исследовать теплопроводность теплоизоляции можно как экспериментальным путем, так и с помощью теоретического расчета.

Если говорить о достоверности экспериментальных данных, то по результатам международного межлабораторного исследования, проведенного в 1993–1995 гг. [1], были получены следующие результаты:

✓ ошибка измерения теплопроводности на приборах, оснащенных тепломерами, в лабораториях России и Литвы составляла +13...+22 %.

✓ ошибка измерения теплопроводности на приборах Канадского института исследований и Исследовательского центра фирмы Partek не превышала 2 %.

Поэтому при выборе характеристик изоляционных материалов целесообразно использовать как экспериментальные данные, так и результаты аналитических расчетов.

Рассмотрим влияние отдельных факторов на коэффициент теплопроводности.

Объемная масса и размер пор

Так как доля газа в теплоизоляционных материалах составляет от 80 до 99 %, то преобладающее влияние на коэффициент их теплопроводности оказывает газ. Обычно поры теплоизоляционного материала заполнены воздухом. При замене воздуха другими газами с более низкой теплопроводностью теплопроводность изоляции можно снизить до 30 % [2]. Однако при использовании таких материалов в условиях низких температур процесс замещения газов на воздух происходит значительно быстрее, чем при повышенных температурах, так как определяется не диффузионным, а молярным переносом.

*См. «Холодильная техника» № 3, 4/2006.

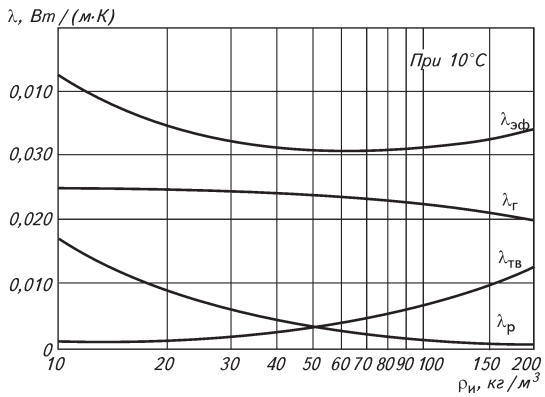

Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого материала от его объемной массы

Поэтому при расчетах низкотемпературной изоляции ее теплопроводность следует определять, полагая, что поры заполнены воздухом [1].

Зная объемную массу изоляции $\rho_и$ и плотность материала, образующего твердый скелет $\rho_{тв}$, можно определить пористость теплоизоляции m:

$m = (\rho_и - \rho_{тв})/\rho_{тв}$.

Эта величина колеблется в пределах 0,7...0,95 [1].

Расчетные формулы для определения кондуктивной теплопроводности теплоизоляции в сухом состоянии были предложены О. Кришером [4]:

$\lambda_q = 1/[(1 - a)/\lambda_1 + a/\lambda_2]$,

где a – коэффициент, зависящий от структуры материала (определяется экспериментально);

$\lambda_1 = (1 + m)\,\lambda_{тв} + m\lambda_г$;

$\lambda_2 = 1/[(1 - m)/\lambda_{тв} + m/\lambda_г]$,

где m – пористость материала, доли единицы;

$\lambda_{тв}$ – теплопроводность твердого скелета;

$\lambda_г$ – теплопроводность газа, заполняющего пористую структуру.

Эти зависимости справедливы как для волокнистых, так и для ячеистых материалов. Из них следует, что чем выше пористость (или чем ниже плотность теплоизоляции), тем ниже кондуктивная составляющая эффективной теплопроводности.

Однако стремление изготовить теплоизоляционный материал, обладающий наименьшей объемной массой, неизбежно приводит к увеличению размера пор. Но в крупных порах (при всех прочих равных условиях) разность температур стенок больше, что влечет за собой увеличение лучистого (радиационного) теплообмена, пропорционального разности четвертых степеней абсолютных температур.

Уменьшение размера пор волокнистой изоляции ведет к снижению конвективной составляющей теплопотерь.

Если же говорить о ячеистых материалах, то конвективного переноса тепла не наблюдается вообще, поскольку эти материалы практически не имеют сквозных пор в отличие от волокнистой изоляции, где сквозная пористость является преобладающей. На долю же радиационной составляющей теплопроводности приходится всего 7–10 % [1].

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого материала от его объемной массы [6], имеющая минимум, находящийся в пределах плотности 40...90 кг/м^3.

Температура

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов возрастает с повышением температуры, поскольку увеличивается теплопроводность как твердых составных частей материалов, так и воздуха, заполняющего поры.

При температурах ниже 50 °С влияние температуры на теплопроводность уступает влиянию, оказываемому влажностью [5]. Однако если в конструкции низкотемпературной тепловой изоляции используется материал с закрытой ячеистой структурой, то, учитывая его чрезвычайно высокое сопротивление влагопоглощению, в технических расчетах можно принимать, что теплопроводность теплоизоляционного слоя имеет линейную зависимость от температуры. Это было подтверждено тестами, проведенными для теплоизоляции из вспененного каучука [7] (рис. 2).

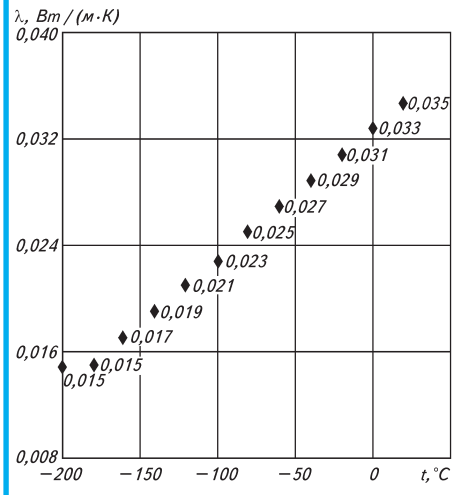

Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента теплопроводности вспененного каучука от температуры

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕ

Химический состав и молекулярное строение твердого скелета

Разница химического состава теплоизоляционных материалов лишь незначительно отражается на их коэффициенте теплопроводности, так как пористость очень велика. Даже между коэффициентами теплопроводности органических и неорганических теплоизоляционных материалов при их одинаковой пористости почти нет разницы [2].

Коэффициент излучения поверхностей, ограничивающих поры

Иногда для уменьшения лучистой составляющей тепловых потерь в состав теплоизоляционного материала вводят добавки, обладающие низким коэффициентом излучения. В [2] установлено, что улучшающие добавки тем эффективнее, чем выше температура теплоизоляции. Если же говорить о низкотемпературном применении, то ощутимый эффект можно получить в криогенной технике при добавлении в вакуумно-порошковую изоляцию, прозрачную для инфракрасного излучения, металлических порошков или кусочков фольги [3].

Давление газа в порах

Коэффициент теплопроводности любого теплоизоляционного материала всегда выше коэффициента молекулярной теплопроводности воздуха. При этом предполагается, что диаметр пор материала несоизмерим с длиной свободного пробега молекул воздуха. Некоторые виды порошкообразных материалов имеют такую степень тонкости и обладают более низким коэффициентом теплопроводности. Однако эти материалы чувствительны к воде, так что при низкотемпературном применении необходима герметичная защита засыпки.

Другим способом снижения теплопроводности является увеличение свободного пробега молекул воздуха путем понижения его давления (т.е. откачивания воздуха из теплоизоляционного материала). Однако реализация этой задачи сравнима по сложности с созданием высоковакуумной теплоизоляции в криогенной технике.

Влажность

Исследования тепло- и влагообмена в низкотемпературной атмосферной теплоизоляции [1] позволили разработать инженерную методику расчета теплопроводности, учитывающую снижение теплозащитных свойств увлажненной теплоизоляции введением поправочного коэффициента η. Уменьшение эффективной теплопроводности зависит от срока службы и вида материала, а также сопротивления пароизоляционного слоя паропроницанию. Как показывают расчеты и экспериментальные данные, более эффективны материалы с закрытой ячеистой структурой и минимальным коэффициентом паропроницаемости.

* * *

Таким образом, лучшими по теплопроводности среди волокнистых материалов являются те материалы, у которых наименьшие объемная масса и диаметр волокна. Однако при низкотемпературном применении они подвергаются интенсивному увлажнению. Если для высокотемпературного применения преобладающее влияние на теплопроводность оказывает температура материала, то при низкотемпературном использовании влияние температуры уступает влиянию влажности.

Теплопроводность **ячеистых материалов** в основном зависит от объемной массы, причем минимум этой зависимости приходится на диапазон 40...90 кг/м^3. Размер ячеек имеет ограниченное влияние на теплозащитные свойства. При снижении температуры теплопроводность материалов уменьшается, причем за счет высокого сопротивления увлажнению снижение их теплозащитных свойств в несколько раз меньше, чем у волокнистых материалов. Более эффективны по теплопроводности за весь срок службы материалы с наименьшей способностью к увлажнению (наименее паропроницаемые).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурьев В.В.* и др. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет. – М.: Стройиздат, 2003.

2. *Каммерер И.С.* Теплоизоляция в промышленности и строительстве. – М.: Стройиздат, 1965.

3. *Малков М.П.* Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

4. *Петров-Денисов В.Г.* и др. Расчетный метод оценки теплозащитных свойств изоляции из минеральной ваты на основе силикатных материалов // Стекло и керамика. 2000. № 9.

5. *Руденко В.В.* и др. Тепловая изоляция в промышленности и строительстве. – М.: Издательство БСТ, 1996.

6. *Kuhn J.* // ZAE Bayern 97074 Würzburg Vortrag SKZ, 20.5.99.

7. Rapport d'essai Dossier E13108 – Document CMI/1 / LNE / 2004.