

А. В. Тихомиров

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 699.86
ББК 38.637
Т46

Тихомиров, А. В.

Т46 Теплоизоляционные материалы и технологии : учебное пособие / А. В. Тихомиров. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 196 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0569-0

Рассмотрены теплоизоляционные материалы и высокопроизводительные методы их нанесения – напыление и торкретирование, предложены методы расчета конструкций. Приведены основы конструирования с применением сферопластиков, экранной и вакуумной теплоизоляции, с использованием наноструктур. Даны примеры решения инженерных задач.

Для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлениям «Строительство» и «Архитектура», аспирантов, а также для специалистов строительных компаний и проектных организаций.

УДК 699.86
ББК 38.637

ISBN 978-5-9729-0569-0

© Тихомиров А. В., 2021
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Список сокращений	9
Пояснения к некоторым специальным физическим и техническим терминам	9
Глава 1. Общие положения теории теплопроводности	11
1.1. Способы переноса теплоты	11
1.2. Основные законы теплопередачи	15
1.3. Метод расчета нестационарного температурного поля	19
Вопросы для самопроверки	21
Глава 2. Методы формирования теплоизоляции	22
2.1. Материалы для плиточного метода теплоизоляции	22
2.2. Материалы для заливочного метода теплоизоляции	31
2.3. Материалы для засыпного метода теплоизоляции	34
2.4. Материалы для напыляемого метода теплоизоляции	40
Вопросы для самопроверки	41
Глава 3. Плиточный метод утепления строительных конструкций	42
3.1. Навесные фасадные системы (НФС)	42
3.2. Технология сборки сэндвич-панелей	49
3.3. Трехслойные конструкции и их применение	51
3.4. Технология применения экранной теплоизоляции	54
3.5. Экранно-вакуумная теплоизоляция	61
3.6. Синтактные пенопласты: основы технологии	69
3.7. Теплоизоляция «горячих» цехов и конструкций	80
Вопросы для самопроверки	87
Глава 4. Заливочный метод утепления строительных конструкций	88
4.1. Фенолформальдегидные пенопласты	88
4.2. Полиуретановые пенопласты	96
Вопросы для самопроверки	103
Глава 5. Засыпной метод утепления строительных конструкций	104
5.1. Технология утепления зданий пенополистиролом	104
5.2. Новые технологии утепления зданий керамзитом	108

5.3. Удивительные свойства вермикулита	114
Вопросы для самопроверки	115
Глава 6. Напыляемые методы утепления строительных конструкций	116
6.1. Технология формирования теплоизоляции пенополиуретаном	116
6.2. Прогрессивная технология торкретирования	133
Вопросы для самопроверки	137
Глава 7. Теплоизоляция нового поколения	138
7.1. Наноструктуры и нанотехнологии в строительстве	138
7.2. Технология твердофазного синтеза ПКМ	142
7.3. Кремниевые технологии в строительстве	145
Вопросы для самопроверки	150
Глава 8. Типовые решения инженерных задач	151
8.1. Определение минимальной толщины теплоизоляции по заданной температуре на ее поверхности	151
8.2. Определение толщины теплоизоляции по заданному коэффициенту теплопередачи	155
8.3. Определение коэффициента теплопередачи охлаждаемых помещений	161
8.4. Расчет толщины пенополиуретанового теплоизоляционного покрытия, напыляемого на металлические конструкции овощехранилища	165
8.5. Расчет термического сопротивления с применением экранной теплоизоляции из пенофола	173
Заключение	177
Приложение 1. Расчетные значения минимальных толщин изоляции металлоконструкции, исключающие выпадение конденсата на ее поверхности	182
Приложение 2. Номограмма для определения толщины воздушной прослойки экранной теплоизоляции	187
Приложение 3. Ответы на вопросы для самопроверки	188
Список использованной литературы	192

ВВЕДЕНИЕ

Согласно *ГОСТ 16381–77* теплоизоляционные материалы классифицируют по виду сырья, по способу его нанесения на конструкции, по теплоизоляционным свойствам. Но, для потребителя, пожалуй, главным являются вид исходного сырья, прочностные характеристики, теплопроводность и горючесть, и конечно стоимость. Вид исходного сырья – это то, из чего сделана теплоизоляция. Теплоизоляционные материалы можно разделить на органические и неорганические. Хорошие прочностные характеристики означают эксплуатационную надежность утеплителя и его способность удерживать заданную форму. Они включают в себя целый ряд показателей, в частности, прочность на сжатие и растяжение, прочность на отрыв слоев. Все это очень важно, так как теплоизоляция в составе конструкции часто подвергается механическим нагрузкам. В наше время из-за высоких цен на энергоносители предъявляются более жесткие требования к теплоизоляции домов. Россия относится к одной из самых холодных стран мира, но при этом теплоизоляция зданий не соответствует мировым стандартам. На отопление помещений у нас тратится в 3 раза больше энергии, чем в скандинавских странах. В соответствии с требованиями изменения № 3 и № 4, введенного в действие Госстроем РФ с 1 марта 1998 г., «Строительная теплотехника», сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций должно составлять не менее $R_0 = 3,15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Это соответствует 212 см кладки из глиняного кирпича, а до этого было в три раза меньше, 64 см. Понятно, что без утеплителей, таких параметров теплоизоляции стен не достичь. Новые дома последние десять лет строятся, уже с соответствующими характеристиками современным требованиям по теплоизоляции. И если у строительной организации дом, не соответствует этим требованиям, то его просто не примут в эксплуатацию. Поэтому частники фактически не могут строить на своих участках что захотят и как захотят. Хотя до сих пор строят обычные кирпичные или деревянные дома без использования дополнительной теплоизоляции, при этом тепловые потери в четыре раза больше нормативных и соответственно гораздо выше счета за отопление. Главное качество для теплоизоляции – это *теплопроводность*. Материал должен обеспечить требуемое сопротивление теплопередаче при минимальной толщине несущей конструкции. Чем ниже теплопроводность, тем лучше теплоизоляция. Коэффициент теплопроводности для изолирующих материалов не должен превышать 0,04–0,06 Вт/(м·К).

Теплоизоляционные материалы должны обладать следующими важными свойствами:

Пониженной горючестью – которую следует рассматривать с точки зрения обеспечения безопасности. Если материал поддерживает горение или выделяет при нагреве вредные вещества, использовать его можно лишь с оговорками. В общем и целом требования пожарной безопасности определяются нормами СНиП 21-01–97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений».

Механической прочностью – способностью материалов сопротивляться разрушению под действием внешних сил, вызывающих деформации и внутренние напряжения в материале. Различают прочность теплоизоляционных материалов на сжатие, изгиб, растяжение, зависящие от структуры, прочности твердой основы материала и параметров пористости. Так жесткий материал с мелкими порами более прочен, чем материал с крупными неравномерными порами.

Плотностью – которая характеризует нагрузки от веса теплоизоляции на конструкцию здания – плотность не должна превышать 185–200 кг/м³.

Водостойкостью – которая просто необходима, особенно в нашем холодном и дождливом климате. Водостойкий утеплитель химически не взаимодействует с влагой, и поэтому сохраняет свои свойства.

Долговечностью – которая зависит от целого ряда других свойств: химических, биологических, стойкости к перепаду температур, а также особенностей фазово-минералогического и химического состава изоляции и др.

Экологичностью – так как человек постоянно находится в помещениях, так или иначе защищенных теплоизоляцией, очень важно, чтобы она была биологически нейтральной и ни в коем случае не являлась источником токсичных выделений.

Вместе с тем при эксплуатации зданий надо сделать все возможное, чтобы снизить тепловые потери. Как известно основная часть теплопотерь в здании происходит не через стены, кровлю или окна. Порядка 60 % теплопотерь происходит через вентиляцию. Тепло, образно выражаясь, «вылетает в трубу». И что самое важное, бороться с этим весьма затруднительно, так как необходим достаточный приток свежего воздуха и удаление избыточной влажности. Если Вас расстраивают большие счета за отопление, то из простых способов можно

порекомендовать в морозы немного прикрывать каналы вытяжки, и закрывать их совсем при покидании дома. Сложными и дорогими, но гораздо более эффективными способами, являются установка систем искусственной вентиляции, которые нагревают входящий в дом свежий воздух за счёт температуры выходящего воздуха. Если не учитывать теплопотери через вентиляцию, то 65–80 % от остающихся теплопотерь приходится на тепловое излучение. Большая часть материалов пропускает излучение из-за своей высокой излучающей способности. Алюминиевая фольга и материалы с её использованием (фольгоизол, фольгопласт, изолон и другие), отражают до 98 % теплового излучения. Поэтому использование для теплоизоляции дома отражающих материалов обязательно. Разумеется, там, где это представляется возможным. В окнах также рекомендуется использовать К-стекло (триплекс¹), способное отражать часть теплового излучения. Теплоизоляцию можно разделить по следующим типам соответствующим разным способам теплопередачи:

- отражающая, которая снижает потери за счёт отражения инфракрасного «теплового» излучения (мастика, теплокраска);
- предотвращающая потери за счёт теплопроводности, водопоглощения, паропроницаемости, то есть за счет кондуктивного и конвективного теплообмена (сочетания передачи тепла через сам материал и воздух или газ, находящийся в нём).

Но проще всего теплоизоляцию можно условно разделить по способу нанесения, обустройства (монтажа) для стен, перекрытий и полов зданий как гражданского, так и промышленного назначения. Это прежде всего, самый массовый и всем доступный способ устройства теплоизоляции – это *плиточный* метод. К этому виду изоляции относятся практически все мягкие, полужесткие и жесткие конструкции, имеющие геометрические размеры (плиты, панели, маты, блоки, экраны). *Засыпной метод* подразумевает формировать теплоизоляцию засыпая в специально подготовленную полость гранулы имеющую низкую теплопроводность (керамзит, пенополистирол, вермикулит, опилки и т. д.). *Заливочным методом* производят то же самое, только в изолируемое пространство заливается вспенивающийся агент (пеноизол, пенополиуретан, карбамидные смолы и т. д.). Как видим, для заливочного метода используются газонаполненные закрыто-

¹ Энергосберегающие стекла или, как их еще называют, теплосберегающие или низкоэмиссионные стекла – это стекла, имеющие особенное напыление из цветных металлов или напыление из ПОМ (полупроводниковых оксидов металлов). Такие стекла способны отражать тепловое излучение и, тем самым, не выпускать тепловую энергию из помещения, равно как и не пропускать ее внутрь. В настоящее время для производства энергосберегающих окон используют стекла двух типов: К-стекла и И-стекла. И-стекло по своим характеристикам превосходит К-стекло. Коэффициент его излучательной способности достигает 0,04 а, соответственно, оконные конструкции с таким стеклом дают больший энергосберегающий эффект. Оно производится по иной технологии и является более прозрачным. Однако И-стекло менее прочно, поэтому при транспортировке и установке стеклопакетов с такими стеклами следует соблюдать осторожность.

ячеистые вспенивающиеся пластмассы. Наиболее высокопроизводительным считается *напыляемый метод*, когда нанесение на изолируемую поверхность наносится методом распыления из специального пистолета-распылителя (пенополиуретан, сухое и мокрое торкретирование цементно-песчаного раствора с пенообразователем)

Список сокращений

- ВАГ* – вспенивающий и отверждающий компонент;
- ФРВ* – фенолформальдегидная смола резольного типа;
- ФРП* – твердый дисперсный минеральный наполнитель;
- УЗФП* – машина для заливки пенопласта;
- БВЗ* – быстровозводимые здания;
- БМЗ* – блок-модульные здания;
- ТИЗ* – теплоизоляция;
- ГСЭ* – газо-структурные элементы;
- ПКМ* – полимеркомпозитные материалы;
- МБС* – модульная бескрепежная система;
- МКРС* – модульная координация размеров в строительстве;
- НФС* – навесная фасадная система;
- ЕМС* – единая модульная система;
- НВФ* – навесной вентилируемый фасад.

Пояснения к некоторым специальным физическим и техническим терминам

1. *Форполимеры* – основные компоненты полимерных материалов, содержащие группы способные участвовать в реакциях роста и сшивания цепи высокомолекулярных соединений.

2. *Фотонная передача тепла* (*фотон* – квант электромагнитного излучения) – передача тепла посредством электромагнитного излучения.

3. *Фононная передача тепла* (*объяснение природы передачи тепла в твердом теле с позиции квантовой физики предложенное Таммом И. Е. в 1949 году*) – фонон – квант вибрации образующийся посредством свободных электронов за счет тепловых колебаний атомов. С увеличением температуры

возрастает внутренняя энергия кристаллической решетки материала и как следствие растет и амплитуда колебаний атомов. Так как связь между атомами решетки достаточно велика, то в случае теплового возбуждения в одном месте решетки оно будет передаваться в виде упругой волны между ними. Упругая волна достигнув поверхности тела, отражается от него. После чего происходит образование стоячей волны и как следствие наложение двух волн – прямой и отраженной. Такая стоячая волна называется нормальным колебанием и она имеет некоторую частоту.

4. *Перколяция* – (протекание) (от лат. *percolo* – просачиваться, протекать), возникает в двух- или многофазных системах при приближении к некоторой критической концентрации, явление проникновения жидкостей через пористые материалы.

5. *Кляммер* – потайной вид крепежного элемента, располагаемый на стыке двух закрепляемых деталей.

6. *Квазистационарное температурное поле* – условно стационарное, проявляющее свойства стационарного состояния в течение достаточно малых промежутков времени.

Глава 1

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

1.1. Способы переноса теплоты

В теплотехнике различают три способа переноса теплоты: *теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.*

Теплопроводность – процесс самопроизвольного переноса теплоты от точек участков тела с более высокой температурой к точкам участков тела с более низкой. Тепло может передаваться по твердым телам, а также в жидкостях и газах.

Конвекция – перемещение массы жидкости или газа из среды с одной температурой в среду с другой температурой. Если движение вызвано разностью плотности нагретых и холодных частиц – это естественная конвекция, если разностью давлений – вынужденная конвекция. Конвекцией теплота передается в жидкостях и газах.

Тепловое излучение – процесс распространения теплоты от излучающего тела с помощью электромагнитных волн. Он обусловлен температурой и оптическими свойствами излучающего тела (твердых тел, трех- и многоатомных газов). В твердых телах теплота передается только теплопроводностью. Излучением теплота передается между телами, расположенными в вакууме. Конвекция, как правило, протекает совместно с теплопроводностью. Совместный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом. Конвективный теплообмен между поверхностью и омывающей ее средой называется *теплоотдачей*. Передача теплоты одновременно двумя или тремя способами называется сложным теплообменом. Передача теплоты от одной среды к другой через разделяющую их стенку называется *теплопередачей*.

Температурное поле тела или системы тел – это совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемого пространства. В общем случае уравнение температурного поля имеет вид:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1.1.1)$$

где t – температура;
 x, y, z – координаты;
 τ – время.

Такое температурное поле называется нестационарным. Если температура с течением времени не изменяется, то температурное поле называется стационарным. Тогда:

$$t = f(x, y, z), dt/d\tau = 0;$$

Температура может быть функцией одной, двух и трех координат, соответственно температурное поле будет одно-, двух- и трехмерным. Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля при $t = f(x)$.

Поверхность, объединяющая точки тела с одинаковой температурой, называется изотермической. Изотермические поверхности не пересекаются, они либо замыкаются на себя, либо заканчиваются на границе тела. Пересечение изотермических поверхностей с плоскостью дает на ней семейство изотерм.

Направление, по которому расстояние между изотермическими поверхностями минимальное, называется нормалью (n) к изотермической поверхности.

Производная температуры по нормали к изотермической поверхности называется температурным градиентом:

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad}T. \quad (1.1.2)$$

Температурный градиент – вектор, направленный по нормали к изотерме в сторону увеличения температуры. Общее количество теплоты, переданное в процессе теплообмена через изотермическую поверхность площадью F в течение времени τ , обозначим $Q\tau$, Дж. Количество теплоты, переданное через изотермическую поверхность площадью F в единицу времени, называется тепловым потоком Q , Вт. Тепловой поток, переданный через единицу поверхности, называется плотностью теплового потока:

$$g = Q/F,$$

где g [Вт/м²].

Вектор плотности теплового потока направлен по нормали к изотермической поверхности (V) в сторону уменьшения температуры (рис. 1.1).

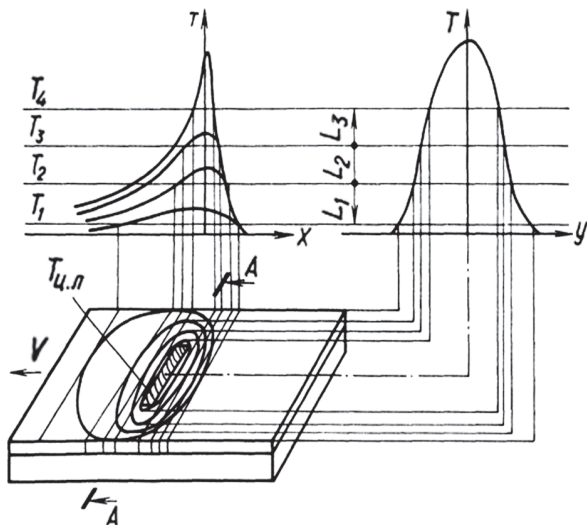


Рис. 1.1. Схема распространения изотерм в зоне нагрева ($T_{ц.п}$) панели при конвективном теплообмене

Наиболее полный комплекс исследований, вскрывающий механизмы распространения температурных полей в системах при конвективном теплообмене выполнен в работах [15, 12, 18]. Учитывая эти работы, а также то, что рассматриваемый нами процесс связан с возможным разрушением одного из элементов системы, попробуем определить механизм распространения температурного поля в различные точки этой системы, как при квазистационарном, так и при нестационарном термическом воздействии. Сначала определим плотность теплового потока и расчётные температуры в системе при квазистационарном термическом воздействии. Нагрев покрытия при перемещении теплового источника относительно очищаемой поверхности связан с возникновением нестационарного поля, как в покрытии, так и в подложке. Однако при постоянном темпе нагрева, когда число Фурье ($F_0 = const$) постоянно, можно сказать, что мы имеем случаи квазистационарной теплопроводности. Тогда в соответствии с теорией теплопроводности Лыкова А. В. плотность теплового потока можно найти, применив формулу из работы.

$$q = K \cdot (T_{пок} - T_{о.с.}), \text{ Вт/м}^2, \quad (1.1.3)$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$,

$T_{ты}$ – температура изоляции, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{о.с.}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи находится по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ППУ}} + \frac{\delta_{ППУ}}{\lambda_{ППУ}} + \frac{\delta_{под}}{\lambda_{под}} + \frac{1}{\alpha_{под}}}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}, \quad (1.1.4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи теплового потока к изоляции, Вт /м² град;

$\delta_{ППУ}$ – толщина изоляции, м;

$\lambda_{П}$ – теплопроводность изоляции, Вт/м·град;

$\delta_{П}$ – толщина подложки, м;

$\lambda_{П}$ – теплопроводность подложки, Вт/м·град;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности подложки к окружающей среде, Вт/м² ·град.

Для того чтобы найти коэффициент теплоотдачи теплового потока к покрытию необходимо знать теплопроводность горячего воздуха при конкретной его температуре, что в свою очередь связано с толщиной удаляемого покрытия. При условии, что температура теплового потока T_{mn} считается заданной, значения температур в покрытии и подложке можно найти из уравнения:

$$q = \alpha_{ППУ} \cdot (E_{m.n} - T_{нок}) = \frac{\lambda_{ппу}}{\delta_{ппу}} \cdot (T_{нок} - T_{mp}) = \alpha_{под} \cdot (T_{под} - T_{a.c}) \quad (1.1.5)$$

Откуда

$$T_{ппу} = T_{m.n} - \frac{q}{\alpha_{нок}}; \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.1.6)$$

$$T_{зр} = T_{нок} - \frac{\delta_{нок}}{\lambda_{нок}}; \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.1.7)$$

$$T_{под} = \frac{q}{\alpha_{под}} + T_{o.c}; \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.1.8)$$

где $T_{ппу}$ – температура покрытия, °C;

$T_{зр}$ – температура граничного слоя между покрытием и подложкой, °C;

$T_{под}$ – температура подложки, °C.

Коэффициент теплоотдачи к теплоизоляции $\alpha_{ппу}$ для начальных условий определяется в такой последовательности

$$\alpha_{\text{нок}} = \frac{N_u \cdot \lambda_g}{d} \quad (1.1.9)$$

$$N_u = 0,356 \cdot Re^{0,6} \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (1.1.10)$$

$$R_c = \frac{v \cdot S \cdot \rho}{\mu} \quad (1.1.11)$$

где N_u – число Нуссельта;

α_g – теплопроводность горячего воздуха;

S – площадь нагрева, м²;

Re – число Рейнольдса;

v – скорость теплового потока, м/с;

ρ – плотность теплового потока, кг/м³;

μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

ε_φ – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева (0,8÷0,9).

1.2. Основные законы теплопередачи

Теплота, передаваемая теплопроводностью, описывается законом Фурье, согласно которому вектор плотности теплового потока пропорционален температурному градиенту:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1.2.1)$$

Тепловой поток, количество теплоты и плотность теплового потока связаны соотношениями:

$$Q = qF \quad (1.2.2)$$

$$Q_\tau = qF\Delta\tau, \quad (1.2.3)$$

где F – площадь изотермической поверхности, м²;

$\Delta\tau$ – промежуток времени, с.

Коэффициент пропорциональности λ в уравнении (1.3) называется коэффициентом теплопроводности и характеризует способность тел передавать теплоту. Размерность данной величины – Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности

зависит от структуры, плотности, влажности, давления и температуры тел. Значения коэффициентов теплопроводности определяются экспериментально и для всех тел (металлов, строительных и изоляционных материалов, жидкостей, газов), содержатся в справочной литературе. Наибольшие коэффициенты теплопроводности имеют металлы, наименьшие – теплоизоляционные материалы и газы. Так как тела могут иметь различную температуру, например, от t_1 до t_2 , то расчеты ведутся при среднем значении коэффициента теплопроводности (λ_{cp}) для данного интервала температур. Если в справочнике значения $\lambda = f(t)$ даются в виде таблицы, то получить λ_{cp} для данного интервала температур несложно. Для многих материалов в справочнике приводится линейная зависимость $\lambda = f(t)$:

$$\lambda(t) = \lambda_0(a \pm bt), \quad (1.2.5)$$

где a, b – постоянные коэффициенты, присущие конкретному материалу. Формулу для расчета λ_{cp} в интервале температур $t_1 - t_2$, нетрудно получить, если решить совместно (1.2.5) и (1.2.6):

$$\lambda_{cp} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (1.2.6) \quad \text{или} \quad \lambda_{cp} = a \pm b \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (1.2.7)$$

Конвективную теплоотдачу между поверхностью с температурой t_c и омывающей ее средой с температурой $t_{жс}$ описывает закон Ньютона – Рихмана, согласно которому плотность теплового потока q пропорциональна разности температур стенки и среды:

$$q = \alpha(t_c - t_{жс}) \quad (1.2.8)$$

По формулам (1.2.3) и (1.2.4) можно вычислить Q и Q_r . Коэффициент пропорциональности α в уравнении (1.2.8) называется коэффициентом теплоотдачи Вт/м²·К и характеризует интенсивность процесса конвективного теплообмена между поверхностью и омывающей ее средой. Принято омывающую поверхность среду (газ, воду, любой теплоноситель) именовать – «жидкость» и обозначать температуру среды – $t_{жс}$. Коэффициент теплоотдачи зависит от температур t_c и $t_{жс}$, от скорости и от свойств жидкости, от формы, размеров, ориентации поверхности и т. д. Коэффициенты теплоотдачи для различных условий теплообмена рассчитываются по специальным уравнениям.

Интегральная плотность теплового потока при переносе теплоты излучением рассчитывается по формуле:

$$q = \varepsilon q = \varepsilon c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.2.9)$$

В уравнении (1.2.9) коэффициентом пропорциональности является степень черноты излучающего тела (ε), которая характеризует его способность излучать и поглощать энергию. Для твердых тел значения ε приводятся в справочниках, для излучающих газов – рассчитываются с помощью номограмм.

Выражение

$$q_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.2.10)$$

известно как закон Стефана – Больцмана, описывающий связь плотности теплового потока и температуры абсолютно черного тела. Коэффициент излучения абсолютно черного тела $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$

Дифференциальное уравнение теплопроводности

В учебниках по теплопередаче, в том числе и в [1], приводится вывод дифференциального уравнения температурного поля движущейся жидкости, уравнение энергии

$$c_p \rho \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) + \omega_x \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \omega_y \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) + \omega_z \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (1.2.11)$$

где c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора скорости движения жидкости;

q_v – объемная плотность внутреннего тепловыделения жидкости, Вт/м³.

Уравнение (1.2.11) записано для случая $\lambda = const$. Дифференциальное уравнение температурного поля для твердых тел называется дифференциальным уравнением теплопроводности и может быть получено из (1.2.11) при условии $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, c_p = c_v = c$:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_p}, \quad (1.2.12)$$

где $\lambda/c_p = a$ – коэффициент температуропроводности, $[m^2/c]$ он характеризует скорость изменения температуры в теле. Значения $a = f(t)$ для различных тел приводятся в справочниках.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_p}$$

Дифференциальное уравнение описывает множество процессов теплопроводности. Чтобы выделить из этого множества конкретный процесс, необходимо сформулировать особенности этого процесса, которые называются *условиями однозначности* и включают в себя:

- геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела;
- физические условия, характеризующие свойства участвующих в теплообмене тел;
- граничные условия, характеризующие условия протекания процесса на границе тела;
- начальные условия, характеризующие начальное состояние системы при нестационарных процессах.

При решении задач теплопроводности различают:

- граничные условия первого рода, задается распределение температуры на поверхности тела:

$$t_c = f(x, y, z, \eta) \text{ или } t_c = const;$$

- граничные условия второго рода, задается плотность теплового потока на поверхности тела:

$$q_c = f(x, y, z, \eta) \text{ или } q_c = const;$$

- граничные условия третьего рода, задаются температура среды $t_{жс}$ и коэффициент теплоотдачи между поверхностью и средой.

В соответствии с законом *Ньютона – Рихмана* тепловой поток, передаваемый с $1 m^2$ поверхности в среду с температурой $t_{жс}$:

$$q = \alpha(t_c - t_{жс}).$$

В то же время этот тепловой поток подводится к $1 m^2$ поверхности из глубинных слоев тела теплопроводностью

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n_{n=0}}$$

Тогда уравнение теплового баланса для поверхности тела запишется в виде

$$\alpha(t_c - t_{жс}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n_{n=0}} \quad (1.2.13)$$

1.3. Метод расчета нестационарного температурного поля

Определение коэффициента теплоотдачи при обогреве помещений с помощью тепловых воздушных потоков (калориферами) представляет трудную задачу. Но, условия теплообмена на наружной поверхности можно достаточно точно определить, решая задачу теплопроводности при постановке граничных условий, используя экспериментальные данные. Для аналитического исследования нестационарных температурных полей обычно применяются решения задач теплопроводности в виде рядов Фурье. Если пренебречь неравномерностью температур по периметру всего обогреваемого помещения из-за относительно небольшого влияния этой разности на весь объем, то найдем решение основного дифференциального уравнения процесса теплопередачи для всего помещения.

$$\frac{\partial \theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \theta(\xi, Fo)}{\partial \xi} \quad (1.3.1)$$

Уравнение справедливо только при постоянных во времени коэффициентах теплоотдачи а также при постоянных теплофизических свойствах материалов и следующих краевых условиях:

$$\theta(\xi, 0) = 0 \quad (1.3.2)$$

$$\frac{\partial \theta(\xi_1, Fo)}{\partial \xi} - Bi_1 [\theta_1 - \theta(\xi_1, Fo)] = 0 \quad (1.3.3)$$

$$\frac{\partial \theta(\xi_2, Fo)}{\partial \xi} + Bi_2 [1 - \theta(\xi_2, Fo)] = 0 \quad (1.3.4)$$

где $\theta(\xi, Fo) = \frac{T_0 - T_1}{T_0 - T_2}$ – относительная температура стены помещения;

$\theta_1 = \frac{T_0 - T_1}{T_0 - T_2}$ – относительная температура внутри помещения;

$\xi = \frac{h}{\delta}$ – расстояние от калорифера до стены;