

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	8
1.1. Уравнение нестационарной теплопроводности и условие Стефана	8
1.2. Аналитический расчет температурных возмущений в неограниченном массиве от линейного источника	11
1.3. Колебания фронта промерзания в цилиндрическом массиве с источником теплоты на оси	17
1.4. Оценка скорости для предотвращения замораживания воды при движении в теплопроводах	21
Глава 2. ЗАДАЧИ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА	25
2.1. Особенности систем утилизации теплоты вытяжного воздуха с промежуточным теплоносителем	25
2.2. Определение энтальпийной эффективности утилизации теплоты в схеме с промежуточным теплоносителем	29
2.3. Аналитический учет конденсации водяных паров при тепловом расчете охладителей-утилизаторов	33
2.4. Учет неравномерности водопотребления в системах утилизации теплоты вытяжного воздуха на нужды горячего водоснабжения	38
2.5. Особенности утилизации теплоты вытяжного воздуха при механической вентиляции и большом числе вытяжных систем	44
Глава 3. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	49
3.1. Расчет теплового режима помещения при автоматическом регулировании климатических систем	49
3.2. Тепловой режим помещения при интегральном регулировании систем охлаждения	55
3.3. Расчет температуры воздуха в помещении по безразмерным параметрам при интегральном регулировании климатических систем	65
3.4. Экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей для температуры воздуха в помещении при автоматическом регулировании климатических систем	73
3.5. Применение метода анализа размерностей для решения задач строительной теплофизики и управления тепловым режимом помещения	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
ПРИЛОЖЕНИЕ	83
Библиографический список	87

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач, стоящих перед инженерными системами зданий и сооружений — это обеспечение необходимой степени комфорта для находящихся в помещении людей. Наиболее часто встречающаяся совокупность таких систем представлена на рис. 1 для случая жилого здания.

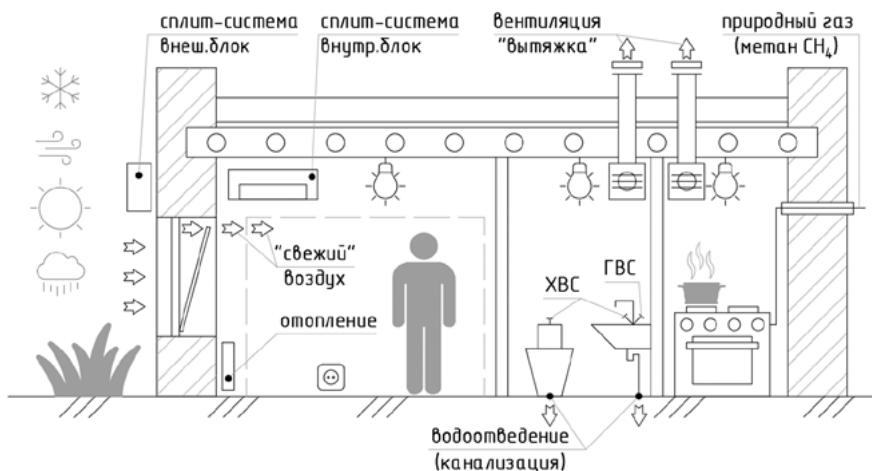


Рис. 1. Инженерные системы здания

Кроме того, действующий в настоящее время Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ требует, чтобы функционирование инженерных систем в первую очередь было нацелено на создание надежной и безопасной среды обитания и деятельности человека, а также на обеспечение безопасности несущих и ограждающих конструкций здания в сочетании с решением вопросов энергосбережения и энергоэффективности. Об этом же идет речь в принятом в тот же период Федеральном законе РФ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ. Поэтому разработка мероприятий по снижению энергопотребления в области обеспечения микроклимата зданий в настоящее время становится еще более актуальной, причем это относится как к активным системам (отопления, вентиляции, кондиционирования).

рования воздуха, горячего водоснабжения и т.д.), так и к пассивным, т.е. главным образом к ограждающим конструкциям здания.

Комфортность пребывания человека в помещении определяется следующими основными параметрами: температура, относительная влажность и подвижность воздуха (или скорость его движения), а также температура поверхностей, обращенных внутрь помещения (радиационная температура). Нормируемые значения данных параметров приведены в ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

Различный уровень потребностей внутренних инженерных систем здания и разная степень централизации или децентрализации той или иной системы приводят к развитию соответствующих наружных инженерных сетей и систем. Принципиальная схема таких систем для населенных пунктов изображена на рис. 2.

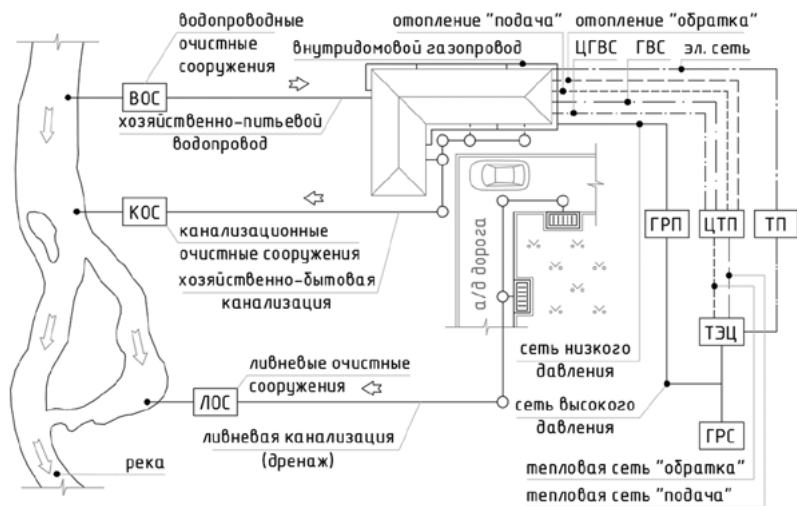


Рис. 2. Наружные распределительные системы населенного пункта

Здесь условные обозначения приведены в соответствии с общепринятыми сокращениями: ХВС — холодное водоснабжение; ГВС — горячее водоснабжение; ЦГВС — циркуляция горячего водоснабжения; ВОС — водопроводные очистные сооружения; КОС — канализационные очистные сооружения; ЛОС — ливневые очистные сооружения; ГРС — газораспределительная станция; ГРП — газорегуляторный

пункт; ЦТП — центральный тепловой пункт; ИТП — индивидуальный тепловой пункт; ТЭЦ — теплоэлектроцентраль; ТП — трансформаторная подстанция.

Необходимо отметить, что первоочередность выполнения требований безопасности в соответствии с законом № 384-ФЗ в сочетании с его рамочным характером делает особенно актуальной дальнейшую разработку методов расчета теплового и влажностного режима ограждающих конструкций, помещений и зданий в целом, а также трубопроводов и других элементов, обслуживающих эти здания инженерных систем, особенно в нестационарных условиях. Данные методы должны быть, с одной стороны, физически обоснованными, а с другой, несмотря на значительное развитие и распространение численных алгоритмов и использование ЭВМ, доступными для инженеров при широком применении в практике проектирования.

В предлагаемой работе изложение материала осуществляется в последовательности, соответствующей постепенному усложнению изучаемых вопросов:

- в главе 1 рассматриваются внутренние задачи, т.е. процессы, протекающие главным образом в толще ограждающих конструкций, в трубопроводах и массиве грунта;

- глава 2 посвящена исследованию процессов в оборудовании, используемом в системах утилизации теплоты вытяжного воздуха, в том числе при наличии фазовых переходов влаги;

- в главе 3 исследуются вопросы, связанные с влиянием автоматизации систем отопления-охлаждения и кондиционирования воздуха на нестационарный тепловой режим обслуживаемого помещения.

Глава 1. ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

1.1. Уравнение нестационарной теплопроводности и условие Стефана

Задачи, требующие исследования процессов нестационарной теплопроводности в областях и конструкциях разной геометрической формы, встречаются на практике достаточно часто. К ним относятся, например, различного рода аварийные ситуации в системах отопления и теплоснабжения, когда необходимо оценить скорость понижения температуры теплоносителя и воздуха в помещениях, а также задачи расчета нестационарного теплового режима помещений, обслуживаемых автоматизированными системами обеспечения микроклимата, в условиях переменных теплопоступлений, вопросы, связанные с промерзанием и оттаиванием грунта при колебаниях температуры наружного воздуха или теплоносителя в трубопроводах тепловых сетей, и некоторые другие. Часть подобных задач будет рассмотрена в предлагаемой работе (глава 1 и глава 3).

Все исследования такого типа опираются на решение дифференциального уравнения теплопроводности в твердых телах для нестационарного режима, которое обычно называется уравнением Фурье. Как известно, в одномерном случае при использовании прямоугольных координат это уравнение выглядит следующим образом [1], [2], [3], [4]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

где a — коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$; λ — его теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; c и ρ — соответственно удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, и плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ — момент времени, с, для которого вычисляется значение температуры t , К. Если решается двумерная или трехмерная задача, тогда вместо $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ в (1.1) нужно подставить суммы вторых производных t по всем соответствующим пространственным координатам. Так как $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ с геометрической точки зрения имеет смысл кривизны температурного поля вдоль оси X , физическая сущность уравнения Фурье состоит в том, что скорость выравнивания температуры с течением времени, равная производной $\frac{\partial t}{\partial \tau}$, будет пропорциональна кривизне профиля температуры в данной точке.

Чтобы получить однозначное решение, уравнение (1.1) нужно дополнить еще граничными условиями, определяющими на границах рассматриваемой области либо значения температуры (условия 1-го рода), либо плотности теплового потока q , Вт/м² (условия 2-го рода), либо интенсивность теплообмена (условия 3-го рода). Наиболее часто применяются условия 3-го рода, которые в наиболее простом варианте для одномерных задач при использовании прямоугольных координат можно записать в следующем виде [1], [2], [3], [4]:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha(t_{\text{cp}} - t_{\text{пов}}), \quad (1.2)$$

где $t_{\text{пов}}$ и t_{cp} — соответственно температура поверхности твердого тела и омывающей его среды, К; α — коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью и средой, Вт/(м²·К). Знак «минус» слева от знака равенства в уравнении (1.2) взят в соответствии с соглашением, что положительным нужно считать направление оси X от поверхности вглубь материала. Таким образом, физический смысл (1.2) заключается в отражении мгновенного равенства кондуктивного и конвективного потоков теплоты через поверхность, то есть, в сущности, выражение (1.2) представляет собой ее уравнение теплового баланса.

Кроме того, необходимы также начальные условия, задающие распределение t в момент времени $\tau = 0$. Если задача сопровождается изменением фазового состояния среды в процессе ее промерзания или оттаивания, на границе раздела фаз следует использовать условие Стефана. В простейшем одномерном случае оно будет выглядеть так [1], [4]:

$$wr_{\text{пл}} \frac{\partial x_F}{\partial \tau} = \Delta q_F = \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x_F-0} - \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x_F+0}. \quad (1.3)$$

Здесь x_F — текущая координата фронта промерзания (оттаивания), м; w — объемное содержание замерзающей влаги в материале, кг/м³; $r_{\text{пл}}$ — ее удельная теплота плавления, Дж/кг. Значения λ при этом нужно брать, вообще говоря, различными для промерзшей и оттаявшей областей. Параметр Δq_F , Вт/м² — по сути не что иное, как скачок плотности теплового потока на фронте промерзания из-за его теплоинерционных свойств, и в соответствии с (1.3) получается, что скорость перемещения фронта пропорциональна величине этого скачка.

Конечно, желательно было бы получение аналитических решений (1.1) с соответствующими условиями типа (1.2) и (1.3), потому что

в этом случае мы пришли бы к конечным формулам, которые можно непосредственно использовать для расчетов, в том числе и инженерных. Тем не менее на практике это удается обычно только для наиболее простых случаев, которыми не охватывается все имеющееся многообразие практических приложений. Иногда также может оказаться, что даже при наличии таких решений они являются настолько сложными, что для вычислений по ним необходимы программы для ЭВМ. Однако и тогда аналитические решения приносят значительную пользу, так как позволяют видеть общий характер искомых зависимостей и дают возможность выделить основные факторы, влияющие на результат.

Что касается непосредственно уравнения Фурье, в одномерном случае аналитическое решение проще всего записать для так называемого регулярного режима. Он проявляется при больших значениях времени, когда уже почти перестает сказываться влияние исходного распределения температуры, и поэтому общий вид температурного поля и его изменения со временем определяются в первую очередь геометрией области, теплофизическими параметрами материала и условиями поверхностного теплообмена. Нетрудно показать, что в общем случае такое решение выглядит следующим образом:

$$t(x, \tau) = f(x) \exp(-ak^2\tau). \quad (1.4)$$

Данное уравнение получается при непосредственном решении (1.1) методом разделения переменных [1], [3], [4]. Для этого нужно представить температуру в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от x , а другая — только от τ , тогда $t(x, \tau) = f(x) F(\tau)$. Подставим теперь это выражение в (1.1):

$$f(x) \frac{dF}{d\tau} = aF(\tau) \frac{d^2f}{dx^2} \quad (1.5)$$

или, после деления обеих частей на $af(x)F(\tau)$:

$$\frac{dF}{aFd\tau} = \frac{d^2f}{fdx^2}. \quad (1.6)$$

Так как левая часть зависит только от τ , а правая — только от x , равенство при любых x и τ будет иметь место только при условии, если обе части окажутся равными некоторому постоянному числу, которое обычно обозначают как $-k^2$. В этом случае из левой части находим:

$$\frac{dF}{F} = -ak^2d\tau, \quad (1.7)$$

откуда и получаем выражение для $F(\tau)$, входящее в (1.4). Здесь уже легко увидеть, почему постоянная в (1.6) должна быть именно отрицательной — иначе отклонение температуры от исходного уровня с течением времени само по себе стало бы неограниченно возрастать, что физически невозможно.

Другими словами, в каждый следующий момент времени распределение температуры в материале экспоненциально стремится к стационарному, определяемому только граничными условиями, т.е. геометрией рассматриваемой области. Такое поведение решения вообще характерно для дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа, к которым относится и уравнение Фурье (1.1) [1], [4]. Коэффициент k в формуле (1.4) в частном случае для плоской стенки связан с условиями теплообмена на поверхностях, и при значениях критерия Био $Bi = \alpha\delta/\lambda \rightarrow \infty$, где δ — толщина стенки, м, оказывается, что $k \rightarrow \frac{\pi}{2}$.

1.2. Аналитический расчет температурных возмущений в неограниченном массиве от линейного источника

Задача о распространении температурного возмущения в неограниченном массиве вокруг линейного источника малого диаметра представляет значительный интерес для ряда практических приложений. В частности, речь здесь может идти о расчете температурных колебаний, возникающих в системах напольного отопления с замоноличенными трубопроводами горячей воды или греющими электрическими кабелями при регулировании их теплоотдачи. Кроме того, с подобными вопросами можно столкнуться при анализе эксплуатационного режима водяных тепловых сетей в условиях бесканальной прокладки и в других аналогичных случаях. При этом расчет температурного поля в данных условиях имеет значение не только с чисто теплотехнической точки зрения, но и в отношении проверки выполнения требований надежности конструкций и в целом безопасности жизнедеятельности человека, поскольку колебания температуры могут привести к снижению прочности строительных материалов и грунта, к смещению фронта его промерзания, а если говорить о напольном отоплении — к ухудшению санитарно-гигиенических показателей системы. Особое значение это имеет в настоящее время, в условиях действия Закона РФ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» № 384-ФЗ от 30.12.2009 (с последующими изменениями).

Необходимо отметить, что сейчас накоплен большой объем решений задач нестационарной теплопроводности в областях различной геометрической формы при весьма разнообразных начальных условиях. Большинство подобных исследований основано на использовании дифференциального уравнения Фурье [1], [2], [3], хотя для цилиндрической симметрии количество получаемых решений значительно меньше и, в частности, даже в такой фундаментальной работе, как [1], этот вопрос практически не рассматривается. При этом в последние десятилетия, в связи с существенными успехами в развитии вычислительной техники, основное внимание как в нашей стране, так и за рубежом, начинает уделяться численным методам, которые приводят к результатам, представимым чаще всего в графической или табличной форме, хотя в некоторых случаях возможно также получить приближенные аналитические выражения [2], [4]. Однако их редко удастся применить в инженерной практике, поскольку обычно они оказываются весьма сложными [5], [6] либо имеют ограниченную область применения для специфических сооружений, использующихся в ограниченных областях при особых условиях, например, для композитных материалов [7], многослойных конструкций или решеток цилиндров [8].

В публикациях [9], [10] одним из авторов на основе использования программы для ЭВМ, реализующей конечно-разностную аппроксимацию уравнения Фурье, были получены приближенные зависимости, описывающие распространение теплового возмущения вокруг линейного источника при скачкообразном или периодическом изменении температуры на его поверхности. Они имеют достаточно простую форму, но являются следствием аппроксимационной обработки результатов численного расчета на дискретной сетке. Поэтому представляется целесообразным продолжить исследование с целью поиска физически обоснованных выражений, которые были бы равноценными по точности, но в то же время допускали бы теоретическое обоснование и возможность непосредственного сопоставления с имеющимися решениями для других подобных случаев.

В качестве базовой гипотезы примем, что перемещение фронта температурной волны является достаточно медленным. Поэтому можно будет считать в первом приближении, что в пределах области, занятой температурным возмущением, профиль температуры по форме приближается к мгновенно-стационарному, и его можно описать следующим выражением [1], [2], [3], [4]:

$$\theta = 1 - \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(r_\tau/r_0)}. \quad (1.8)$$

Здесь r_0 — радиус источника, м; r_τ — радиус зоны распространения температурной волны в массиве материала для момента времени τ , с, с начала температурного возмущения; θ — относительная безразмерная температура на расстоянии r , м, от оси источника, которую можно определить по выражению:

$$\theta = \frac{t(r, \tau) - t_n}{t_0 - t_n}, \quad (1.9)$$

где $t(r, \tau)$ — температура, К, в массиве материала на расстоянии r от источника для момента времени τ ; t_n и t_0 — соответственно начальная температура массива и температура источника теплоты на его оси, К.

Аналогичные допущения делаются, например, при изучении поведения фронта промерзания и оттаивания материала, и, как правило, они приводят к физически вполне допустимым результатам [1], [2], [3], [4]. Тогда, как нетрудно убедиться, при $r = r_\tau$ будем иметь $\theta = 0$, а при $r = r_0$ $\theta = 1$. Принципиальная схема распределения температуры и используемые условные обозначения показаны на рис. 1.1.

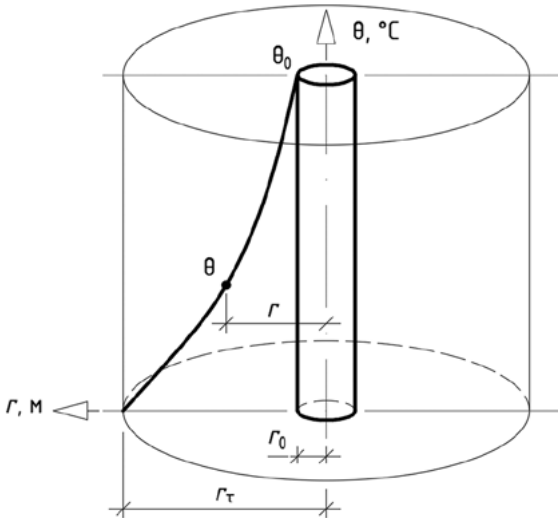


Рис. 1.1. Схематическое изображение цилиндра с осевым теплоисточником и нестационарного профиля температуры в области распространения температурной волны

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru