

Даминов А.З.

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Аннотация

Рассмотрен вопрос математического моделирования теплогидравлических процессов, происходящих в системах трубопроводов тепловых сетей. Математическая модель построена на основе системы балансовых уравнений сохранения энергии, вещества и количества движения сплошной среды с учетом особенностей теплообмена теплоносителя с окружающей средой. Получена система алгебраических уравнений для расчета теплогидравлических процессов. Представлена методика расчета удельных тепловых потоков в системе трубопроводов, характеризующих теплообмен. Методика позволяет определять конечные параметры теплоносителя на выходе из трубопровода при заданной толщине изоляции.

Введение.

Основное назначение любой системы теплоснабжения состоит в обеспечении потребителей необходимым количеством теплоты требуемого качества, т.е. теплоносителем требуемых параметров.

Для проведения исследований трубопроводных систем теплоснабжения необходимо проведение комплексного анализа, включающая в себя математическую модель теплогидравлических процессов при течении теплоносителей в системе теплоснабжения и методику теплогидравлического расчета данных систем.

При тепловом расчете тепловых сетей приходится обычно определять тепловые потоки через слои и поверхности цилиндрической формы. В изолированном трубопроводе, окруженном наружным воздухом, теплота должна пройти внутреннюю поверхность рабочей трубы, стенку трубы, слой изоляции и наружную поверхность изоляции [1-3].

Теоретическая часть

Математическая модель теплогидравлических процессов построена на основе системы балансовых уравнений сохранения энергии, вещества и количества движения сплошной среды с учетом особенностей теплообмена с окружающей средой при его течении по трубопроводу.

Определение конечных параметров теплоносителя на выходе из системы является достаточно трудной задачей, так как все эти параметры меняются по длине и в то же время связаны сложными нелинейными зависимостями.

Базовыми уравнениями для расчета конечных параметров теплоносителя (воды) являются уравнения изменения давления P_B и энтальпии i_B по длине трубопровода:

$$\frac{dP_B}{dl} = -\frac{16G_B^2}{\pi^2 d_{BB}^4} \frac{d}{dl} \left(\frac{1}{\rho_B} \right) - \frac{8G_B^2 \xi_B}{\pi^2 d_{BB}^5 \rho_B} + \rho_B g_l \quad (1)$$

$$\frac{di_B}{dl} = -\frac{16G_B^2}{\pi^2 d_{BB}^4 \rho_B} \frac{d}{dl} \left(\frac{1}{\rho_B} \right) + \frac{q_1(l) - q_0(l)}{G_B n_B} \quad (2)$$

где $(q_1(l) - q_0(l))$ - удельный поток теплоты, воспринимаемый от воздуха под кожухом за вычетом удельного теплового потока, отдаваемого теплоносителем в

окружающую среду; g_1 – проекция вектора ускорения свободного падения на ось канала l , ρ_B – плотность воды; ξ_B – коэффициент трения; G_B – расход воды; d_{BB} – внутренний диаметр трубопровода; n_B – количество трубопроводов.

После ряда преобразований, применяя упрощение систем уравнений, преобразование в стандартную задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и решений с помощью численных методов получаем следующие системы уравнений:

$$P_{BK} = P_{BH} - \int_0^L \left(\frac{8G_B^2}{\pi^2 d_{BB}^5} \frac{\xi(Re)}{\rho_B} + \left(\frac{dz}{dl} \right) g \rho_B \right) dl, \text{Па}, \quad (3)$$

$$i_{BK} = i_{BH} + \int_0^L \left(\frac{q_1(l) - q_0(l)}{G_B n_B} \right) dl, \text{Дж/кг} \quad (4)$$

Каждое из выражений (3-4) можно представить в общем виде:

$$y_K = y_H - \int_0^L f(l, y) dl. \quad (5)$$

Сущность большинства используемых на практике методов численного решения состоит в замене интегральных выражений в системе уравнений (3-4) формулами численного интегрирования.

В самом простейшем случае используется формула левых прямоугольников (метод Эйлера) и величину интеграла в правой части (3-4) можно записать как:

$$\int_0^L f(l, y) dl = f(0, y(0)) \cdot L.$$

Погрешность вычислений при этом имеет порядок ($O(L^2)$), что для больших L приводит к значительной погрешности вычислений.

Запишем формулы вычисления исследуемого интеграла более высокого порядка, а именно второго порядка точности ($O(L^3)$) [4]:

$$1. \int_0^L f(l, y) dl = \frac{1}{2} (f(0, y(0)) + f(L, y(L))) \cdot L,$$

$$2. \int_0^L f(l, y) dl = \frac{1}{2} (f(0, y(0)) + f(L, y(0) + Lf(0, y(0))))L,$$

$$3. \int_0^L f(l, y) dl = Lf\left(\frac{L}{2}, y(0) + \frac{Lf(0, y(0))}{2}\right).$$

Среди методов еще более высокого порядка точности следует отметить метод Рунге-Кутты четвертого порядка ($O(L^5)$), который достаточно часто используется для решения задач Коши [4]:

$$\int_0^L f(l, y) dl = \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

$$\text{где } k_1 = Lf(0, y(0)); k_2 = Lf\left(\frac{L}{2}, y(0) + \frac{k_1}{2}\right); k_3 = Lf\left(\frac{L}{2}, y(0) + \frac{k_2}{2}\right);$$

$$k_4 = Lf(L, y(0) + k_3).$$

Применение этой формулы вместе с увеличением точности требует большего количества вычислений, поэтому с инженерной точки зрения следует воспользоваться

формулой 2-го порядка точности, которая более полно, чем формула левых прямоугольников отражает закон изменения функции y по длине и в тоже время не требует большого числа операций:

Таким образом, запишем (3-4) в виде:

$$P_{BK} \approx P_{BH} - \frac{8G_B^2}{\pi^2 d_{BB}^5} \left(\frac{\xi_{BH}(Re)}{\rho_{BH}} \right) L - 0,5 \left(\frac{dz}{dl} \right) g(\rho_{BH} + \rho_{BK}) L, \text{ Па}, \quad (6)$$

$$i_{BK} \approx i_{BH} + \Delta i_B = i_{BH} + \frac{0,5}{G_B n_B} (q_{1H} + q_{1K} - q_{0H} - q_{0K}) L, \text{ Дж/кг}. \quad (7)$$

Системы уравнений (6-7), являются окончательными расчетными системами используемой в дальнейшем при разработке методики расчета тепловых потоков и самого теплового расчета систем трубопроводов тепловых сетей.

Методика расчета

При расчете систем трубопроводов можно рассматривать две задачи:

1. Определение конечных параметров теплоносителя (воды) при заданных параметрах сети: схема тепловой сети, длина участков, диаметры трубопроводов, толщина изоляции.

2. Определение толщины теплоизоляционного слоя при заданных конечных параметрах теплоносителя у абонентов.

Для решения обеих задач будем считать заданными следующие величины:

- данные, характеризующие трубопровод: температура воды на входе в трубопровод t_{BH} , °С; давление воды на входе в трубопровод P_B , Па; массовый расход воды G_B , кг/с; наружный диаметр трубопровода d_{BH} , м; внутренний диаметр трубопровода, d_{BB} , м; коэффициент теплопроводности материала стенок трубопровода $\lambda_{вст}$, Вт/(м·К); количество трубопроводов n_B ;

- прочие данные: длина трубопроводов L , м; температура окружающего воздуха $t_{возд}$, °С; материал изоляции; конструкция изоляционного кожуха.

Для решения задачи 1 необходимо ввести дополнительно толщину изоляции $\delta_{из}$, м.

Определение конечных параметров теплоносителя на выходе из системы (у абонентов) является достаточно трудной задачей, так как все эти параметры меняются по длине и в то же время связаны сложными нелинейными зависимостями. Под системой здесь и в дальнейшем будем понимать систему трубопроводов тепловой сети.

Рассматривая схемы взаимного расположения прямых и обратных трубопроводов, можно выделить следующие удельные тепловые потоки, характеризующие теплообмен в этой системе. Это: q - удельный тепловой поток от теплоносителя прямого трубопровода к воздуху под кожухом изоляции; q_1 - от воздуха под кожухом к теплоносителю обратного трубопровода; q_2 - от воздуха под кожухом в окружающую среду через слой изоляции; q_0 - от теплоносителя в окружающую среду через стенки трубопроводов и слоя изоляции. Поскольку в данном случае речь идет о тепловых потоках, характеризующих теплообмен на входе в систему, всем им присваивается индекс «н». Таким образом, здесь определяются значения удельных тепловых потоков q_n , q_{1n} , q_{2n} и q_{0n} . Процедура вычисления удельных тепловых потоков q , q_1 , q_2 и q_0 , производится по ходу вычислений еще несколько раз для нахождения параметров системы на выходе из рассматриваемого участка. Поэтому методика расчета удельных тепловых потоков будет вынесена в отдельный расчетный блок и подробно описан в дальнейшем.

Таким образом, в начале решения задачи 1 (блок-схема представлена на рис. 1) производится определение удельных тепловых потоков q_n , q_{1n} , q_{2n} и q_{0n} , при этом в расчете в качестве параметров теплоносителя, используем величины: $t_{пр.н}$ и $t_{пр.к}$ -

температура воды прямого трубопровода в начальном и конечном участках; $t_{обр.н.}$ и $t_{обр.к.}$ – температура воды обратного трубопровода в начальном и конечном участках.

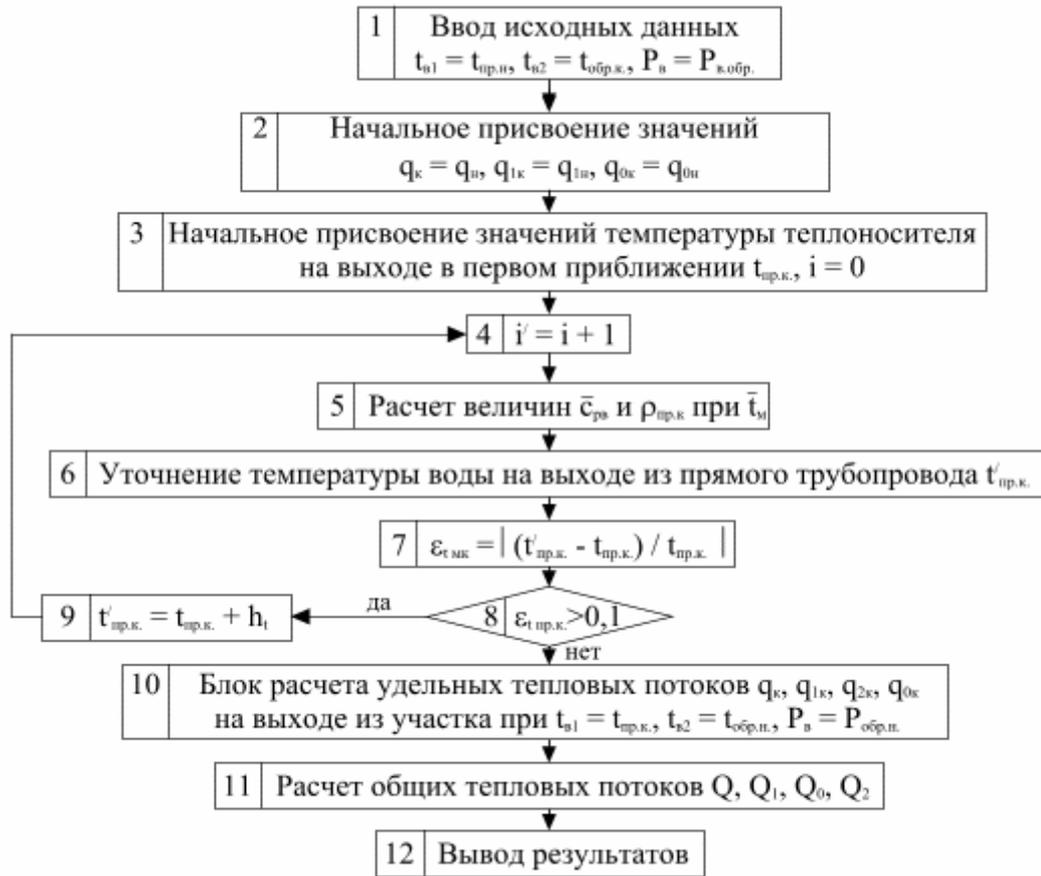


Рис. 1. Блок-схема расчета конечных параметров теплоносителя на выходе из трубопровода при заданной толщине изоляции

Поскольку величины удельных тепловых потоков q теплоносителя прямого трубопровода к воздуху под кожухом изоляции и т.д. меняются по длине трубопровода, то при строгих расчетах количество теплоты Q , Q_1 и Q_0 следует определять с помощью интегрирования тепловых потоков q , q_1 и q_0 по длине трубопровода.

Величина q , q_1 и q_0 в каждой точке в этом случае вычисляется с помощью решения сложной системы дифференциальных уравнений, получить решение которой в аналитическом виде не всегда представляется возможным, а применение численных методов сопряжено с большим количеством производимых вычислений. Поэтому для вычисления тепловых потоков Q , Q_1 и Q_0 воспользуемся также как и раньше методом второго порядка точности:

$$\begin{aligned}
 Q &= 0,5(q_n + q_k)L, \text{Вт}; \\
 Q_1 &= 0,5(q_{1н} + q_{1к})L, \text{Вт}; \\
 Q_0 &= 0,5(q_{0н} + q_{0к})L, \text{Вт}; \\
 Q_2 &= 0,5(q_{2н} + q_{2к})L, \text{Вт}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Формула (8) тем лучше отражает реальное значение Q , чем меньше длина рассматриваемого участка L , при этом предполагается равномерное распределение теплоносителя по сечению трубопровода.

Методика расчета толщины теплоизоляционного слоя в зависимости от назначения тепловой изоляции оборудования и трубопроводов в СНиП 41-03-2003 [5] «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» не приводится, и настоящее время следует пользоваться сводом правил СП 41-103-2000 [6] «Проектирование тепловой изоляции», где приведены формулы для расчета.

Расчеты тепловой изоляции трубопроводов при подземной прокладке в канале с удовлетворительной для практики точностью выполняются по инженерной методике, учитывающей термическое сопротивление теплоизоляционного слоя, сопротивление теплоотдаче на границе теплоизоляции и стенок канала с воздухом в канале и термическое сопротивление стенок канала и грунта. Термическое сопротивление грунта рассчитывается по известной формуле Форхгеймера, учитывающей теплопроводность грунта в условиях эксплуатации, диаметр теплопровода и глубину его заложения. При двухтрубной прокладке учитывается взаимное тепловое влияние прямого и обратного теплопровода.

Расчеты тепловой изоляции при бесканальной прокладке трубопроводов выполняются по методике, учитывающей термическое сопротивление теплоизоляционного слоя и термическое сопротивление грунта.

В практике при двухтрубной прокладке трубопроводов тепловых сетей в канале толщина теплоизоляционного слоя обратного трубопровода с учетом монтажных требований принимается равной толщине теплоизоляции подающего трубопровода.

При расчете тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей двухтрубной бесканальной и канальной прокладки нормируются суммарные тепловые потери прямого и обратного трубопроводов. При этом толщина теплоизоляционного слоя принимается одинаковой для прямого и обратного трубопроводов.

Рассмотрим, представленную на рис. 2 блок-схему, методику решения задачи 2, для которой введем дополнительные данные: температура теплоносителя на выходе из трубопровода $t_{пр.к.}$, °С.

1. Предварительно задаемся величиной $\delta_{из}$. В качестве предварительного приближения $\delta_{из}$ рекомендуется воспользоваться приближенной формулой

$$\delta_{из} = \left(f \frac{t_m - t_0}{Q'} - \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha_0} \right) \lambda_{из}, \quad (9)$$

где $Q' = G_{обр.} \cdot n_{обр.} \cdot d_{обр.} \cdot L \alpha_0 (t_{обр.к.} - t_{обр.н.}) - G_{пр.} \cdot n_{пр.} \cdot (t_{пр.к.} - t_{пр.н.})$; $\alpha_0 \approx 9,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²; $\alpha \approx 17,4 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²; $\lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности материала изоляции, рассчитанный при $\bar{t}_{из} = 0,5(t_{пр.} + t_0)$; t_0 - температура окружающей среды, которая в нашем случае определяется как температура окружающего воздуха; f - поверхность изоляции.

2. Рассчитываем конечную температуру теплоносителя по методике, представленной выше.

3. Если полученное в результате расчетов значение $t_{пр.к.}$ меньше заданного значения, то величину $\delta_{из}$ следует увеличить, в противном случае наоборот уменьшить и вновь рассчитать конечную температуру теплоносителя и так до тех пор, пока не будет достигнута нужная степень точности расчета величины $\delta_{из}$.

Для решения частного случая задачи 2 - определения толщины изоляции, необходимой для поддержания температуры теплоносителя в пределах заданного значения, необходимо воспользоваться методикой решения задачи 2, полагая при этом $t_{пр.к.} = t_{пр.н.}$.

Выше были рассмотрены частные случаи расчетов тепловых сетей, сам алгоритм теплогидравлического расчета можно представить в виде блок-схемы, представленной на рис. 3 [7, 8].



Рис. 2. Блок-схема расчета толщины изоляции при заданных параметрах теплоносителя на выходе из трубопровода

Методика теплогидравлического расчета позволяет определять значения температур теплоносителя и диаметры различных участков трубопроводов, суммарные потери давления по всей трассе, скорости движения теплоносителя по трубопроводам. Это в свою очередь дает возможность определять затраты энергии в виде мощности, необходимой для транспортирования теплоносителя по системе трубопроводов и выявить внутренние резервы энергии на его прокачку.

Работа выполняется при финансовой поддержке РГНФ (грант №06-02-00177) и ФАНИ (гос. контракт №02.516.11.6025).

Литература

- [1] Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. – М.: Издательство МЭИ, 1999.
- [2] Лямин А.А., Скворцов А.А. Проектирование и расчет конструкций тепловых сетей. М.: Стройиздат, 1965.
- [3] Справочное пособие. Водяные тепловые сети / Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [4] Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И. Вычислительные методы. Т2. М.: Наука. 1977.
- [5] СНиП 41-03-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Постановление Госстроя России от 26.06.2003 № 115.
- [6] СП 41-103-2000 Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Постановление Госстроя России от 16.08.2000 № 81.
- [7] Даминов А.З. Комплексная методика расчета многотрубной системы теплоснабжения. Труды Академэнерго, 2006, №1.
- [8] Даминов А.З. Сценарный подход развития систем теплоснабжения населенных пунктов. Труды Академэнерго, 2007, №3.

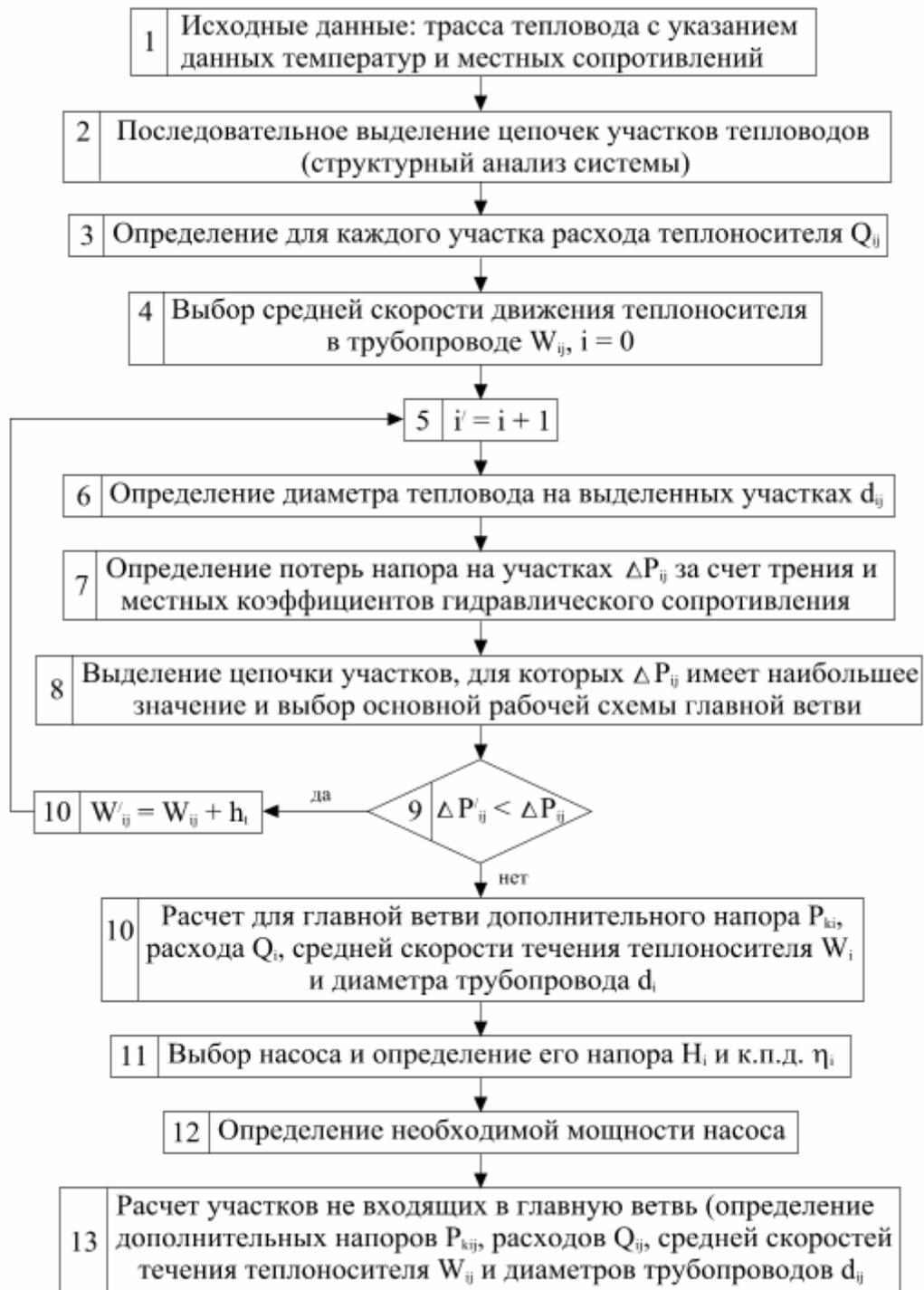


Рис. 3. Блок-схема теплогидравлического расчета трубопроводов системы теплоснабжения