

УДК 697.34+519

ДАМИНОВ А.З.

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Розглянуто питання математичного моделювання теплогідрравлічних процесів у системах трубопроводів теплових мереж. Одержано систему алгебраїчних рівнянь для розрахунку теплогідрравлічних процесів. Подано методику теплового розрахунку трубопроводів теплових мереж.

Рассмотрен вопрос математического моделирования теплогидравлических процессов, происходящих в системах трубопроводов тепловых сетей. Получена система алгебраических уравнений для расчета теплогидравлических процессов. Изложена методика теплового расчета трубопроводов тепловых сетей.

The problem of mathematical modeling of thermohydraulic processes in pipe systems of heat networks is considered. A set of algebraic equations for the calculation of thermohydraulic processes is derived. The thermal design procedure of pipe systems of heat networks is described.

C_p – удельная теплоемкость;
 d – диаметр трубопровода;
 G – расход;
 g – ускорение свободного падения;
 h_t – шаг;
 f – поверхность;
 i – энтальпия;
 L – общая длина участка трубопровода;
 l – длина участка трубопровода;
 n – количество трубопроводов;
 P – давление;
 Q – тепловой поток;
 q – удельный тепловой поток;
 t – температура;
 W – скорость;
 α – коэффициент теплоотдачи;

λ – коэффициент теплопроводности;
 ξ – коэффициент трения;
 ρ – плотность;
 δ – толщина.

Индексы нижние:

о – теплоноситель – окружающая среда;
 1 – воздух – теплоноситель;
 в – вода (теплоноситель);
 вв – внутренний диаметр трубопровода;
 возд – окружающий воздух;
 из – изоляция;
 пр – прямой трубопровод;
 обр – обратный трубопровод;
 н – начальный участок;
 к – конечный участок;
 кан – канал.

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

При тепловом расчете тепловых сетей приходится обычно определять тепловые потоки через слои и поверхности различной формы. В трубопроводе, проложенном в канале и окруженном внутриканальным воздухом, теплота должна

пройти внутреннюю поверхность рабочей трубы, стенку трубы, слой изоляции и наружную поверхность изоляции [1–3].

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 течении теплоносителя 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:

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

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

После ряда математических преобразований получаем следующую систему уравнений:

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

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

Запишем систему (3–4), применив для численного интегрирования правой части уравнения формулу прямоугольников [4], в виде:

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

$$i_{BK} \approx i_{BH} + \Delta i_B = i_{BH} + \frac{0,5}{G_B n_B} (q_{1H} + q_{1K} - q_{0H} - q_{0K}) L. \quad (6)$$

Система уравнений (5–6) используется в методике расчета тепловых потоков и в самом тепловом расчете систем трубопроводов тепловых сетей.

При тепловом расчете систем трубопроводов можно рассматривать две основные 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.

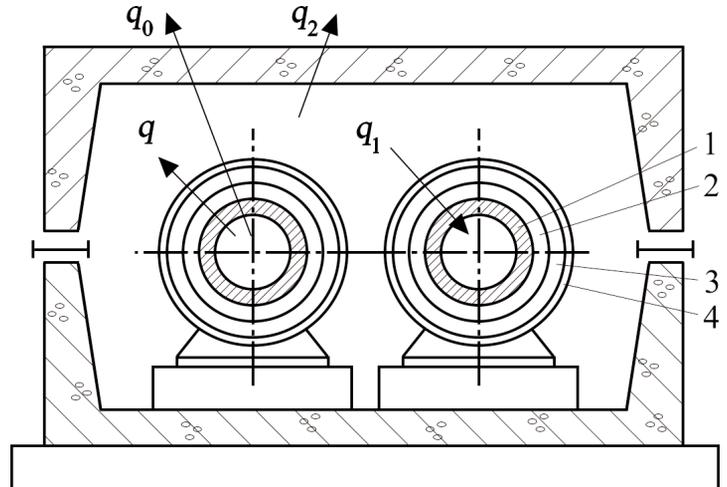


Рис. 1. Расположение прямого и обратного трубопроводов с распределением удельных тепловых потоков:

1 — трубопровод; 2 — антикоррозионное покрытие; 3 — теплоизоляционный слой; 4 — защитное покрытие.

Для решения обеих задач будем считать заданными следующие величины:

- данные, характеризующие трубопровод: температура воды на входе в трубопровод; давление воды на входе в трубопровод; массовый расход воды; наружный диаметр трубопровода; внутренний диаметр трубопровода; коэффициент теплопроводности материала стенок трубопровода, количество трубопроводов;

- прочие данные: длина трубопроводов; температура окружающего воздуха; материал изоляции; конструкция канала.

Для решения задачи 1 необходимо ввести дополнительно величину толщины изоляции.

Рассматривая схемы взаимного расположения прямых и обратных трубопроводов (рис. 1) [1], можно выделить следующие удельные тепловые потоки, характеризующие теплообмен в этой системе: q — удельный тепловой поток от теплоносителя прямого трубопровода к воздуху в канале; q_1 — от воздуха в канале к теплоносителю обратного трубопровода; q_2 — от воздуха в канале в окружающую среду через стенку канала; q_0 — от теплоносителя в окружающую среду через стенки трубопроводов, слой изоляции и стенку канала. Поскольку в данном случае речь идет о тепловых потоках, характеризующих теплообмен на входе

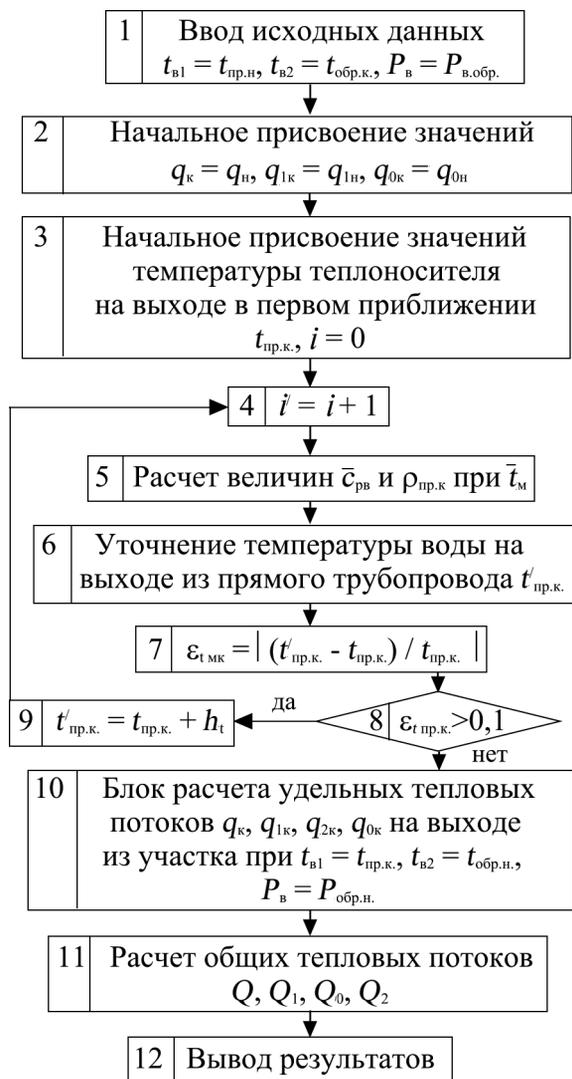


Рис. 2. Блок-схема расчета конечных параметров теплоносителя на выходе из трубопровода при заданной толщине изоляции.

в систему, всем им присваивается индекс “н”. Таким образом, здесь определяются значения удельных тепловых потоков $q_{н}$, $q_{1н}$, $q_{2н}$ и $q_{0н}$. Процедура вычисления удельных тепловых потоков q , q_1 , q_2 и q_0 проводится 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.

Таким образом, в начале решения задачи 1 (блок-схема представлена на рис. 2) выполняется определение удельных тепловых потоков $q_{н}$, $q_{1н}$, $q_{2н}$ и $q_{0н}$, при этом в расчете в качестве парамет-

ров теплоносителя используем величины температуры воды прямого трубопровода в начальном и конечном участках, а также температуры воды обратного трубопровода в начальном и конечном участках.

Поскольку величины удельных тепловых потоков q теплоносителя прямого трубопровода к воздуху в канале 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 так же как и раньше методом второго порядка точности:

$$\begin{aligned}
 Q &= 0,5(q_{н} + q_{к})L; \\
 Q_1 &= 0,5(q_{1н} + q_{1к})L; \\
 Q_0 &= 0,5(q_{0н} + q_{0к})L; \\
 Q_2 &= 0,5(q_{2н} + q_{2к})L.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

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



Рис. 3. Блок-схема расчета толщины изоляции при заданных параметрах теплоносителя на выходе из трубопровода.

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.

Рассмотрим представленную на рис. 3 блок-схему методики решения задачи 2, для которой введем дополнительные данные: температуру теплоносителя на выходе из трубопровода $t_{\text{пр.к.}}$.

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

$$\delta_{\text{из}} = \left(f \frac{t_{\text{пр.н}} - t_{\text{кан}}}{Q} - \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha_0} \right) \lambda_{\text{из}}, \quad (8)$$

где $Q = G_{\text{обр}} n_{\text{обр}} d_{\text{обр}} L \alpha_0 (t_{\text{обр.к.}} - t_{\text{обр.н}}) - G_{\text{пр}} n_{\text{пр}} (t_{\text{пр.к.}} - t_{\text{пр.н}})$; $\alpha_0 \approx 9,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²;

$\alpha \approx 17,4 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²; $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м·К), рассчитанный при $t_{\text{из}} = 0,5(t_{\text{пр.н}} + t_{\text{кан}})$.

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

3. Если полученное в результате расчетов значение $t_{\text{пр.к.}}$ меньше заданного значения, то величину $\delta_{\text{из}}$ 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 $\delta_{\text{из}}$.

Для решения частного случая задачи 2 – определения толщины изоляции, необходимой для поддержания температуры теплоносителя в пределах заданного значения, необходимо воспользоваться методикой решения задачи 1, полагая при этом $t_{\text{пр.к.}} = t_{\text{пр.н.}}$.

Выше были рассмотрены частные случаи расчетов тепловых сетей, сам алгоритм теплогидравлического расчета можно представить в виде блок-схемы, представленной на рис. 4 [7, 8].

Выводы

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. – 472 с.
2. Лямин А.А., Скворцов А.А. Проектирование и расчет конструкций тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1965. – 295 с.
3. Справочное пособие. Водяные тепловые сети / Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.
4. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И. Вычислительные методы. Т2. – М.: Наука, 1977. – 400 с.



Рис. 4. Блок-схема теплогидравлического расчета трубопроводов системы теплоснабжения.

5. *СНиП 41-03-2003*. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Постановление Госстроя России № 114 от 26.06.2003.

6. *СП 41-103-2000*. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. Постановление Госстроя России № 81 от 16.08.2000.

7. *Даминов А.З.* Комплексная методика расчета многотрубной системы теплоснабжения // Труды Академэнерго. – 2006. – № 1. – С. 127–131.

8. *Даминов А.З.* Сценарный подход развития систем теплоснабжения населенных пунктов // Труды Академэнерго. – 2007. – № 3. – С. 40–46.

Получено 28.05.2008 г.