

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Приводится обзор основных методов гидравлического расчета систем водяного отопления, их преимущества и недостатки, рассматривается метод нестационарного гидравлического расчета систем отопления.

Система водяного отопления представляет собой разветвленную закольцованную сеть трубопроводов и отопительных приборов, заполненных водой.

Одним из наиболее трудоемких расчетов при проектировании систем водяного отопления является гидравлический расчет, который проводится в соответствии с законами гидравлики. Расчет основан на следующем принципе: при установившемся движении воды действующая в системе разность располагаемого давления (насосного и естественного) полностью расходуется на преодоление гидравлического сопротивления движению.

Правильный гидравлический расчет предопределяет работоспособность системы отопления. Точный расчет системы связан с решением большого числа нелинейных уравнений. Решение упрощается при выполнении требований СНиП применять трубы по имеющемуся сортаменту. В этих условиях гидравлический расчет заключается в подборе по сортаменту площади поперечного сечения (диаметра) труб, достаточной для подачи нужного количества воды в приборы системы. Потери давления при перемещении требуемого количества воды по трубопроводам принятого диаметра определяются гидравлическими сопротивлениями системы.

Гидравлический расчет системы водяного отопления выполняют различными способами. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Первый способ гидравлического расчета - **по удельным линейным потерям давления** [1, 2, 3, 4], когда подбирают диаметр труб при равных перепадах температуры воды во всех стояках и ветвях  $\Delta t_{ст}$ , соответствующих расчетному перепаду температуры воды во всей системе  $\Delta t_c$

$$\Delta t_{ст} = \Delta t_c, \text{ причем } \Delta t_c = t_r - t_o,$$

где  $t_r$  - расчетная температура горячей воды, поступающей в систему отопления;

$t_o$  - расчетная температура охлажденной воды, уходящей из системы отопления.

Предварительно вычисляют расход воды на каждом участке по формуле

$$G_{уч} = \frac{Q_{уч} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2}{c \cdot (t_r - t_o)}, \quad (1)$$

где  $Q_{уч}$  - тепловая нагрузка участка;

$\beta_1$  - поправочный коэффициент, учитывающий теплопередачу через дополнительную площадь (сверх расчетной) приборов, принятых к установке;

$\beta_2$  - поправочный коэффициент, учитывающий дополнительные теплотери вследствие размещения отопительных приборов у наружных ограждений;

$$c = 4,187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}} - \text{удельная массовая теплоемкость воды.}$$

Потери гидростатического давления в потоке воды вследствие линейных потерь (первое слагаемое) при трении о стенки трубы и местных сопротивлений (второе слагаемое) из-за деформации потока в фасонных частях, арматуре и приборах на участке определяют по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{уч}} = \frac{\lambda}{d_b} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot l_{\text{уч}} + \sum \zeta_{\text{уч}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = R \cdot l_{\text{уч}} + Z, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;

$l_{\text{уч}}$  - длина участка, м;

$\sum \zeta_{\text{уч}}$  - сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке;

$d_b$  - внутренний диаметр трубы, м;

$\rho$  - средняя плотность воды на участке, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  - средняя скорость движения воды на участке, м/с;

$R = \frac{\lambda}{d_b} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$  - удельные потери давления на трение на длине 1 м, Па/м;

$Z = \sum \zeta_{\text{уч}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$  - потери давления на местные сопротивления, Па.

Потери давления в циркуляционном кольце системы:

1) при последовательном соединении  $N$  участков

$$\Delta p_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^N (R \cdot l_{\text{уч}} + Z), \quad (3)$$

т. е. равны сумме потерь давления на участках, составляющих кольцо;

2) при параллельном соединении двух участков, стояков или ветвей

$$\Delta p_i = \Delta p_j, \quad (4)$$

т. е. потери давления на параллельно соединенных участках, стояках или ветвях равны.

Второй способ гидравлического расчета - по характеристикам сопротивления и проводимостям [1, 2, 3, 4], когда устанавливают распределение потоков воды в циркуляционных кольцах системы и получают неравные перепады температуры воды в стояках и ветвях

$$\Delta t_{\text{ст}} \ll \Delta t_c. \quad (5)$$

При этом допускают отклонение  $\Delta t_{\text{ст}}$  на  $\pm 7$  °С (при  $t_r$  до 115 °С) и ограничивают минимальную температуру воды, уходящей из стояков и ветвей в расчетных условиях, 60 °С. Предварительно выбирают диаметр труб на каждом участке с учетом допустимой скорости движения воды и конструктивных соображений.

Потери давления на трение и местные сопротивления на участке определяют совместно по преобразованной формуле (2)

$$\Delta p_{\text{уч}} = \left( \frac{\lambda}{d_b} \cdot l_{\text{уч}} + \sum \zeta_{\text{уч}} \right) \cdot \frac{\rho \cdot v_{\text{уч}}^2}{2} = A_{\text{уч}} \cdot \left( \frac{\lambda}{d_b} \cdot l_{\text{уч}} + \sum \zeta_{\text{уч}} \right) \cdot G_{\text{уч}}^2 = S_{\text{уч}} \cdot G_{\text{уч}}^2, \quad (6)$$

где  $v_{\text{уч}} = \frac{4 \cdot G_{\text{уч}}}{3600 \cdot \rho \cdot \pi \cdot d_b^2}$  - скорость движения воды, м/с;

$G_{\text{уч}}$  - расход воды на рассчитываемом участке, кг/ч;

$A_{\text{уч}} = \frac{6,25}{10^8 \cdot \rho \cdot d_b^4}$  - удельное гидродинамическое давление на участке, Па/(кг/ч)<sup>2</sup>;

$S_{\text{уч}} = A_{\text{уч}} \cdot \left( \frac{\lambda}{d_{\text{в}}} \cdot l_{\text{уч}} + \sum \zeta_{\text{уч}} \right)$  - характеристика гидравлического сопротивления участка, Па/(кг/ч)<sup>2</sup>.

Потери давления на участке могут быть также выражены через проводимость участка

$$\Delta p_{\text{уч}} = \left( \frac{G_{\text{уч}}}{\sigma_{\text{уч}}} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{уч}}$  - проводимость участка, кг/(ч · Па<sup>0,5</sup>).

Проводимость связана с характеристикой сопротивления зависимостью

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{S}}. \quad (8)$$

Характеристика гидравлического сопротивления может быть получена как для отдельного участка, так и для нескольких участков, соединенных между собой последовательно или параллельно:

1) общая характеристика гидравлического сопротивления последовательно соединенных  $N$  участков (при одинаковых расходах теплоносителя на всех участках)

$$S_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^N S_i, \quad (9)$$

т. е. равна сумме характеристик сопротивления участков.

2) общая характеристика гидравлического сопротивления параллельно соединенных двух участков (характеристика сопротивления так называемого узла)

$$S_{\text{уз}} = \frac{1}{(\sigma_1 + \sigma_2)^2} = \frac{1}{(1/\sqrt{S_1} + 1/\sqrt{S_2})^2}, \quad (10)$$

т. е. характеристика сопротивления узла параллельных участков равняется обратной величине квадрата суммы проводимостей участков, его составляющих (при условии равенства естественных циркуляционных давлений, действующих в кольцах, включающих параллельно соединенные участки). В данном случае проводимости участков -  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . При включении в узел третьего параллельного участка с характеристикой сопротивления  $S_3$  (проводимостью  $\sigma_3$ ) в формулу вводится третье слагаемое в скобки знаменателя -  $\sigma_3$  (или  $1/\sqrt{S_3}$ ).

Характеристики сопротивления узлов, соединенных последовательно с участками, суммируют с характеристиками сопротивления этих участков. Следовательно, характеристика сопротивления однетрубного стояка, состоящего из последовательно соединенных приборных узлов и участков, равна

$$S_{\text{ст}} = \sum S_{\text{уч}} + \sum S_{\text{уз}}. \quad (11)$$

В сложные узлы могут объединяться параллельно соединенные и стояки и ветви системы для получения  $S_c$  - характеристики сопротивления системы. Тогда потери давления в системе  $\Delta p_c$  при известном расходе воды  $G_c$  могут быть найдены по формуле

$$\Delta p_c = S_c \cdot G_c^2. \quad (12)$$

Гидравлический расчет по первому способу раскрывает физическую картину распределения сопротивлений в системе, но выполняется с невязками потерь давления в смежных циркуляционных кольцах. Вследствие этого на практике после окончания

монтажных работ требуется проводить пусконаладочное регулирование системы во избежание нарушения расчетного распределения воды по отопительным приборам.

Гидравлический расчет по второму способу применяют при повышенной скорости движения воды в системе, когда возможно использование постоянных значений коэффициентов  $\lambda$  и  $\zeta$ . В результате расчета определяются действительные значения расхода и температуры воды в ветвях, стояках и приборах системы отопления.

Известны способы гидравлического расчета систем отопления **по приведенным длинам и по динамическим давлениям** [1, 2, 3, 4], основанные также на формуле Дарси-Вейсбаха.

Приведенные длины участков включают дополнительные длины труб, эквивалентные по потерям давления на участках в местных сопротивлениях ( $l_{пр} = l_{уч} + l_{экв}$ ). Способ приведенных длин применяется при гидравлических расчетах систем парового отопления высокого давления и наружных теплопроводов.

При гидравлическом расчете по динамическим давлениям ( $p_{дин} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ ), наоборот, к коэффициентам местных сопротивлений участков прибавляют дополнительные коэффициенты местных сопротивлений, эквивалентные по потерям давления линейным потерям на участках ( $\sum \zeta_{пр} = \sum \zeta_{уч} + \sum \zeta_{экв}$ ). Способ динамических давлений целесообразно применять для расчета систем водяного отопления с короткими участками и многочисленными местными сопротивлениями.

Гидравлический расчет связан с тепловым расчетом отопительных приборов и трубопроводов. Требуется многократное повторение расчетов для выявления действительных расхода и температуры воды, необходимой площади приборов. При расчете вручную сначала выполняют гидравлический расчет системы, принимая средние значения коэффициентов местных сопротивлений приборов, затем – тепловой расчет труб и приборов.

Выполнение гидравлического и теплового расчетов в ручную трудоемко, поэтому при проектировании пользуются специализированными расчетными программами (ARS, Oventrop CO и др.)

Рассмотренные способы гидравлического расчета систем водяного отопления учитывают стационарные режимы расчета систем отопления и не включают переходные и аварийные режимы, зависящие от режимов работы наружных тепловых сетей. Также в рассмотренных способах гидравлического расчета затруднен учет естественного гидравлического давления, возникающего из-за охлаждения теплоносителя в трубопроводах и отопительных приборах.

Для учета отмеченных факторов при проведении гидравлического расчета необходимо использовать систему дифференциальных уравнений в частных производных (уравнение движения и уравнение неразрывности), дополняя их соответствующими начальными и граничным условиями.

Выпишем эти дифференциальные уравнения:

1. Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

2. Уравнение движения

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = -(\lambda + \xi \cdot \frac{d}{dx}) \cdot \frac{|v| \cdot v}{2 \cdot d} + g \cdot \cos \alpha, \quad (13)$$

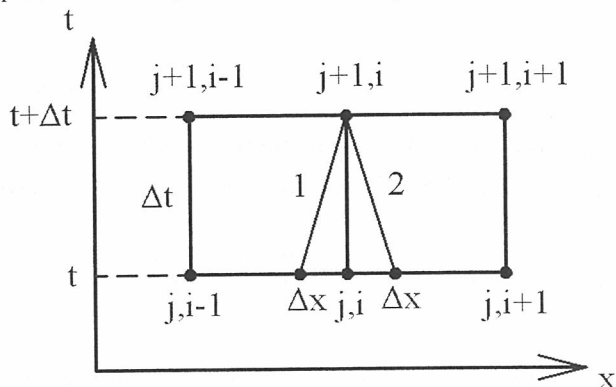
где  $t$  – переменная по времени;

$x$  - переменная по координате;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения;

$\alpha$  - угол между осью  $x$  и вектором силы тяжести.

Для численного решения нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных используется явный конечно-разностный метод Куранта, Изаксона и Риса [5] или, как его еще называют “метод пространственных разностей вперед и назад”. Разности по времени берутся вперед, а разности по пространству для каждого из уравнений берут вперед или назад, согласно наклону соответствующей характеристики.



Конечно-разностная схема

1 – характеристика, соответствующая разности координат назад;

2 – характеристика, соответствующая разности координат вперед.

Необходимым условием устойчивости конечно-разностной схемы является условие Куранта, Фридрихса и Леви [5]

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{|v| + a}, \quad (14)$$

где  $\Delta t$  - шаг по времени;

$\Delta x$  - шаг по координате;

$a$  – скорость звука, м/с .

Уравнения в конечно-разностном виде имеют вид:

$$p_{j+1,i} = p_{j,i} - \frac{v_{j,i} + a_i}{2} \cdot (p_{j,i} - p_{j,i-1} + \rho_{j,i} \cdot a_i \cdot (v_{j,i} - v_{j,i-1})) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} - \frac{v_{j,i} - a_i}{2} \cdot (p_{j,i+1} - p_{j,i} - \rho_{j,i} \cdot a_i \cdot (v_{j,i+1} - v_{j,i})) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad (15)$$

$$v_{j+1,i} = v_{j,i} - \frac{v_{j,i} + a_i}{2} \cdot (v_{j,i} - v_{j,i-1} + \frac{p_{j,i} - p_{j,i-1}}{\rho_{j,i} \cdot a_i}) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} + \frac{v_{j,i} - a_i}{2} \times (-v_{j,i+1} + v_{j,i} + \frac{p_{j,i+1} - p_{j,i}}{\rho_{j,i} \cdot a_i}) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} - ((\lambda + \xi_i) \cdot \frac{d}{\Delta x}) \cdot \frac{|v_{j,i}| \cdot v_{j,i}}{2 \cdot d} - g \cdot \cos \alpha_i) \cdot \Delta t, \quad (16)$$

где  $j$  – узел по оси времени  $t$ ;

$i$  – узел по оси координат  $x$ .

На основе уравнений (15) и (16) реализована программа численного расчета для участка трубопровода систем отопления в инженерном пакете Mathsoft Mathcad.

Разработанная программа расчета участка трубопровода позволит выполнять гидравлические расчеты систем отопления с учетом нестационарных переходных режимов совместно с тепловым расчетом отопительных приборов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сканава А.Н., Махов Л.М. Отопление: Учебник для вузов. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 576с.: ил.
2. Богословский В.Н. и др. Отопление и вентиляция: Учебник для вузов/ В.Н. Богословский, В.П. Щеглов, Н.Н. Разумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1980. – 295с.: ил.
3. Тихомиров К.В., Сергеев Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 480с.: ил.
4. Ткачук А.Я. Проектирование систем водяного отопления: Учеб. пособие. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 192с.: ил.
5. Вазов В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 487с.

*М.Ю. МАХОТАЕВА, С.В. ДАНИЛОВА*

### **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В Г. ПСКОВЕ**

В данной статье рассматривается рынок жилищного строительства г. Пскова, анализируются его проблемы и перспективы. В рамках выявленных направлений разрабатываются конкретные мероприятия, направленные на развитие данной отрасли.

Одной из проблем, наиболее остро стоящих на сегодняшний день перед населением нашей страны, является проблема нехватки доступного и комфортного жилья.

Благосостояние населения России растет, увеличивается средняя заработная плата граждан. Однако более интенсивно повышаются цены на жилье. Покупка отдельной квартиры крайне затруднительна для средней семьи, особенно для молодой, если возраст супругов до 30 лет и у них еще нет собственных накоплений на первый взнос по ипотечному кредиту.

В числе других причин, усугубляющих ситуацию, остаются недостаточный объем строительства жилья, а значит, низкий уровень предложения, неразвитость институтов жилищного кредитования и накопительных схем, высокий уровень рисков и издержек, административные и бюрократические барьеры для инвестиционной и строительной деятельности, монополизация строительных рынков, малый объем финансирования федеральных и региональных программ.

В совокупности все это создает напряженность в обеспеченности граждан нормальными жилищными условиями. Сегодня, по данным Росстата, около 4,4 млн. семей признаны остро нуждающимися в улучшении жилищных условий. Всего по данным проведенных опросов хотели бы изменить свои жилищные условия около 28 млн. семей, или 61 % населения России.

Решение данной проблемы представляется невозможным без модернизации и дальнейшего развития такой отрасли экономики, как жилищное строительство.

Жилищное строительство представляет собой возведение жилых зданий (жилых домов) и строений, предназначенных для проживания физических лиц. Как самостоятельная отрасль, жилищное строительство характеризуется индивидуальным характером производимых объектов, длительным производственным циклом, сметной себестоимостью и т.д.

Государственная поддержка жилищного строительства выражается в налоговых льготах, государственных заказах, а также в осуществлении национального проекта «Доступное и комфортное жильё - гражданам России», включающего на сегодняшний день пакет из 27 законов. Его целью выступает формирование рынка доступного жилья и обеспечение комфортных условий проживания граждан России.

Современное жилищное строительство характеризуется определенными тенденциями, как в сфере конструктивных решений, так и в сфере применяемых материалов и техники. К числу таких тенденций можно отнести: