

УДК 697.4

**ДОПУЩЕНИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ****Минко В.А., Семенов А.С., Елистратова Ю.В.***ГОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,  
Белгород, e-mail: seminenko.as@gmail.com*

Проведен анализ методик гидравлического расчета систем отопления, предложенных отечественными инженерами и учеными в области гидравлических систем. Приведен алгоритм расчета методами удельной потери давления, эквивалентных местных сопротивлений, динамических давлений, характеристик сопротивления, перемещения единицы расхода, эквивалентных отверстий. Отмечены основные допущения расчета при определении расчетной температуры теплоносителя, режима движения и характеристик гидравлического сопротивления элементов гидравлической системы. Обозначены направления дальнейших исследований по адаптации метода гидравлического расчета к современным особенностям систем отопления и возможностям инженеров-проектировщиков.

**Ключевые слова:** отопление, гидравлический расчет, кмс, коэффициент местного сопротивления, температура теплоносителя, режим движения

**ASSUMPTIONS AND PRECONDITIONS METHODS OF HYDRAULIC CALCULATION OF HEATING SYSTEMS****Minko V.A., Seminenko A.S., Elistratova Y.V.***Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod,  
e-mail: seminenko.as@gmail.com*

The analysis of methods of hydraulic calculation of heating systems, offered by domestic engineers and scientists in the field of hydraulic systems. An algorithm of the calculation methods of the specific pressure loss of the equivalent of the local resistance, dynamic pressure, resistance characteristics, moving units of consumption, equivalent holes. The basic assumptions of calculation when determining the calculated temperature of the heat carrier, mode of movement and the characteristics of the hydraulic resistance of elements of a hydraulic system. The directions of further research on adaptation of the method of hydraulic calculation of the modern features of heating systems and the capabilities of engineers.

**Keywords:** heating, hydraulic calculation, the coefficient of the local resistance, temperature, movement mode

Отрасль ЖКХ является основой для обеспечения социального комфорта и обеспечения наиболее базовых потребностей населения. На нее приходится до 70% потенциала энергосбережения страны, поэтому Закон РФ «Об энергосбережении...» от 23 ноября 2009 г., определяющий основные направления для повышения энергетической эффективности, является актуальным.

Энергоемкость предоставления коммунальных услуг в 4 и более раз превосходит аналогичные средние показатели стран со сходным климатом [11]. Большая часть теплоснабжения отрасли приходится на системы отопления. В качестве основных мероприятий по повышению энергоэффективности систем отопления предусматривают [12]: замену отопительных приборов с обязательной установкой термостатов и отражающих экранов, применение регулирования отпуска и поквартирного учета тепла, переход к схеме индивидуального поквартирного теплоснабжения, использование альтернативных источников тепла (система утилизации сбросного тепла условно-чистых сточных вод, система сбора тепла грунта, биогаз [16]) и др.

Однако наряду с энергорасточительностью систем отопления (СО), существует другой недостаток – снижение температуры внутреннего воздуха отдельных помещений относительно оптимального диапазона [13]. Основной расчет СО – гидравлический, позволяющий каждому потребителю тепла быть уверенным, что к его отопительному прибору поступит теплоноситель достаточного энергетического потенциала (с необходимой температурой при достаточном количестве). Именно он призван решить вторую по значимости задачу функционирования инженерных сетей – распределение потоков (если за первую принять гарантированное обеспечение температурного графика теплоносителя).

Гидравлический расчет комплексно решает задачи [10, 5]: обеспечения требуемой подачи теплоносителя ко всем отопительным приборам; сведения к минимуму эксплуатационных затрат; снижения капитальных вложений на монтаж трубопроводов; надежности и безопасности работы сети.

**Цель и задачи исследования.** С проектной точки зрения гидравлический расчет системы отопления дает возможность:

рассчитать оптимальные диаметры труб по участкам ветвления; определить потери давления на участках; произвести увязку приборов и запорно-регулирующей арматуры сети; оценить расходы теплоносителя на участках.

Таким образом, правильный гидравлический расчет предопределяет работоспособность системы отопления. Точный расчет системы связан с разрешением большого числа нелинейных уравнений, а существующие методики имеют специфические особенности. Можно выделить две группы существующих методов:

- в ходе расчета которых, перепад температур теплоносителя в стояках и ветвях принят неизменным (равным), по отношению к общему перепаду температуры в сети и в итоге расчеты определяются потери давления в циркуляционных кольцах: а) метод удельной потери давления; б) метод динамических давлений; в) метод характеристик сопротивления; г) метод эквивалентных сопротивлений; д) метод эквивалентных длин.

- в ходе расчета которых, перепад температур теплоносителя в стояках и ветвях принимается неравным, общему перепаду температуры в сети, результатом которого является распределение расходов теплоносителя по кольцам системы: а) метод динамических давлений; б) метод характеристик сопротивления.

Метод удельной потери давления. В проектировании систем отопления наиболее распространенным является метод удельной потери давления, заключающийся в раздельном подсчете потерь давления на трение и на местные сопротивления каждого участка системы.

Общие потери давления на всех расчетных участках рассчитываемой гидравлической системы выражаются формулой:

$$P = \sum_1^n (Rl + Z), \text{ Па} \quad (1)$$

где  $R$  – удельные потери на трение, Па/м;  $\lambda$  – безразмерный коэффициент трения;  $l$  – длина трубопровода расчетного участка, м;  $Z$  – потери давления в местных сопротивлениях, Па.

Удельная потеря давления на трения  $R$  прямо пропорциональна коэффициенту трения  $\lambda$  и динамическому давлению  $P_d$  и обратно пропорциональна диаметру трубы  $d$ .

$$R = \frac{\lambda}{d} P_d = \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2} \rho, \text{ Па / м} \quad (2)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы, м;  $P_d$  – динамическое давление, Па;  $v$  – скорость потока, м/с;  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

Потери давления в местных сопротивлениях  $Z$  зависят от направления движения теплоносителя и изменения его скорости.

$$Z = P_d \sum \xi = \frac{v^2}{2} \rho \sum \xi, \text{ Па} \quad (3)$$

где  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений (к.м.с.) на расчетном участке.

При расчете потерь давления в местных сопротивлениях, учитывается безразмерный коэффициент местного сопротивления  $\xi$ , индивидуально присущими каждому отдельному местному сопротивлению, значение которых, может быть определено опытом, для всех видов местных сопротивлений, встречающихся в отопительной технике. Стоит только появиться новой конструкции крана, вентиля и т.п., возникает необходимость установления значения данного к.м.с. лабораторным путем [2]. Значения  $\xi$ , указанные в справочных таблицах, являются усредненными, более точные величины к.м.с. фасонных частей системы можно получить, используя соответствующие экспериментальные зависимости И.Е. Идельчика [4]. Однако сегодняшний день на строительном рынке представлен значительный перечень нового оборудования отопительных систем, для которых в справочной литературе отсутствует информация о гидравлическом сопротивлении.

Диаметры трубопроводов определяются методом подбора, при этом перепад температуры во всех ветвях и стояках считается равным, т.е. таким же, как расчетный перепад температуры воды во всей системе.

Метод удельной потери рекомендуется применять [15] при относительно небольших скоростях воды, например, в гравитационных двухтрубных системах отопления, однетрубных системах отопления, в которых при низких скоростях теплоносителя коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  не пропорционален квадрату скорости.

Рассматриваемый способ раскрывает физическую картину распределения сопротивлений в системе, но не учитывает взаимного влияния сопротивлений друг на друга. Выполняется с невязками потерь давления в смежных циркуляционных кольцах, поэтому по окончании монтажных работ, необ-

ходимо проводить пусконаладочные работы по регулированию системы во избежание нарушения расчетного распределения воды по циркуляционным кольцам. Между тем практика показывает, что произвести увязку колец путем монтажной регулировки достаточно сложно, поэтому часто выполняется лишь по требованию потребителя.

Кроме того, в ходе расчета данным методом, невозможно учесть гидравлическую и тепловую устойчивость системы, т.е. отследить способность системы пропорционально изменять расход теплоносителя во всех приборах.

Отметим, что способ удельной потери давления является одним из самых популярных, иногда его называют «классическим», для его упрощения существуют специальные таблицы, графики и номограммы. Так, например, Б.Н. Лобаевым составлена номограмма, которая представляет собой логарифмическую сетку. Применение подобных номограмм позволяет быстро получать конечные результаты с большой точностью, но в случае допущения проектировщиков ошибки, проверка сводится к повторному расчету.

Метод эквивалентных местных сопротивлений (Б.Н. Лобаев [9]) рекомендован

автором для расчета сложных разветвленных сетей, в том числе и систем водяного отопления. Сущность этого метода заключается в следующем. При гидравлическом расчете трубопроводов полную величину располагаемого перепада давлений  $P_p$  делят на длину рассматриваемой ветви расчетной схемы  $\Sigma l$ . В результате находят средний располагаемый перепад давлений на 1 м трубопровода, включающий потери на трение и потери в местных сопротивлениях [17], а именно:

$$R_0 = \frac{P_p}{\Sigma l}, \text{ Па / м} \quad (4)$$

где  $R_0$  – средний располагаемый перепад давлений на 1 м трубопровода, Па/м;  $P_p$  – располагаемый перепад давлений в трубопроводе, Па;  $\Sigma l$  – длина рассматриваемой ветви расчетной схемы, м.

Отсюда разность давлений на любом расчетном участке ( $P_n$ ) длиной  $l_n$  равна:

$$P_n = R_0 l_n, \text{ Па} \quad (5)$$

Таким образом, располагаемое давление, которое должно быть израсходовано на трение и местные сопротивления на каждом участке циркуляционного кольца определяется по формуле:

$$\Delta P_n = \frac{\lambda}{d} l \frac{v^2}{2} \rho + \Sigma \xi \frac{v^2}{2} \rho = \left( \frac{\lambda}{d} l + \Sigma \xi \right) \frac{v^2}{2} \rho, \text{ Па} \quad (6)$$

На основании (6), выразив скорость потока через расход и диаметр трубы, определяют потери давления на расчетном участке:

$$P_n = \left( \frac{\lambda l}{d^5} + \frac{\Sigma \xi}{d^4} \right) \frac{G^2}{2 \left( \frac{\pi}{4} \right)^2 \rho}, \text{ Па.} \quad (7)$$

где  $G$  – расход воды, кг/с;

В водяных системах отопления для упрощения расчета плотность воды принята величиной постоянной (при  $t = 80^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 971,8 \text{ кг/м}^3$ ). При расходе воды  $G$ , кг/ч, и внутреннем диаметре  $d$ , мм, после соответствующих преобразований потери давления на расчетном участке:

$$P_n = 0,67 \left( \frac{1000 \lambda l}{d^5} + \frac{\Sigma \xi}{d^4} \right) G^2, \text{ Па.} \quad (8)$$

Если обозначить выражение в скобках через коэффициент  $\mu$ , называемый гидравлическим критерием [17], формула принимает более простой вид:

$$P_n = 0,67 \mu G^2, \text{ Па} \quad (9)$$

Гидравлический критерий  $\mu$  зависит от конструктивных особенностей расчетного участка при данном расходе воды, т.е. от длины и диаметра трубы, коэффициента трения и суммы коэффициентов местных сопротивлений. Для упрощения данного метода расчета Лобаевым Б.Н. [17] предложена номограмма, по которой, зная заранее требуемую величину потерь давления на расчетном участке  $P_n$ , находят искомый диаметр трубы  $d$ , который будет окончательным при известном расходе и неизменном значении  $\Sigma \xi$ , без повторных пересчетов участков трубопровода.

Метод динамических давлений (И.С. Либер [8]). Этот метод основывается на том, что потери на трение заменяются равновеликими им потерями в местных сопротивлениях:

$$\xi_{\text{экв}} = Rl = \frac{\lambda}{d} l, \quad (10)$$

Тогда потери давления в трубопроводе определяются по формуле:

$$P_n = (\xi_{\text{экв}} + \sum \xi) P_\partial, \text{ Па} \quad (11)$$

где  $P_\partial$  – динамическое давление, Па:

$$P_\partial = \frac{v^2}{2} \rho. \quad (12)$$

Величина  $\xi_{\text{экв}} + \sum \xi = \xi_{\text{пр}}$  называется приведенным коэффициентом сопротивления расчетного участка, который для некоторых узлов системы отопления табулирован. Но необходимо учитывать, что если рассчитываемый узел подобен представленному узлу в таблице схематично, но в его конструкции применяется, например, другая запорно-регулирующая арматура, то принимать значение  $\xi_{\text{пр}}$  нельзя.

На основании выше рассмотренных формул потери давления в трубопроводе:

$$P_n = \xi_{\text{пр}} P_\partial, \text{ Па} \quad (13)$$

«Обратный» метод данного расчета заключается, в том, что располагаемый перепад давлений задан изначально. После определения действующего в системе естественного давления  $P_e$  и действительного перепада давлений в системе отопления  $P_n$ :

$$P_e = 13 g n h_3 \Delta t, \text{ Па} \quad (14)$$

где  $n$  – число этажей;  $h_3$  – высота этажа в здании, м;  $\Delta t$  – разность температур теплоносителя в подающей и обратной магистралях, °С.

Действительный перепад давлений в системе отопления:

$$P_n = P_p + P_e, \text{ Па} \quad (15)$$

где  $P_p$  – располагаемое давление на вводе в здание, Па.

Расчетная потеря давления в стояке находится исходя из разности между действительным перепадом давлений в системе и суммой потерь давления на общих участках магистральных трубопроводов от распределительных гребенок до стояка:

$$P'_{\text{ст}} = P_n + P_{\text{уч. маг. тр.}}, \text{ Па} \quad (16)$$

где  $P'_{\text{ст}}$  – расчетная потеря давления в стояке, Па;  $P_n$  – действительный перепад давлений в системе отопления, Па;  $P_{\text{уч. маг. тр.}}$  – давления на общих участках магистральных трубопроводов от распределительных гребенок до стояка, Па.

Зная приведенный к.м.с.  $\xi_{\text{пр}}$  рассматриваемого стояка (сумма приведенных к.м.с.) и расчетную потерю давления в стояке  $P'_{\text{ст}}$ , определяем динамическое давление в рассматриваемом стояке:

$$P_\partial = \frac{P'_{\text{ст}}}{\xi_{\text{ст}}}, \text{ Па} \quad (17)$$

По получившемуся значению  $P_\partial$  и известному диаметру стояка, согласно табл. 51 [14] находим величину расхода теплоносителя в стояке  $G_{\text{ст}}$ , кг/ч и перепад температур:

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{ст}}}{G_{\text{ст}}}, \text{ °С} \quad (18)$$

где  $Q_{\text{ст}}$  – тепловая нагрузка стояка, Вт;  $G_{\text{ст}}$  – расход воды в стояке, кг/ч.

Способ динамических давлений целесообразно применять [14] для расчета систем водяного отопления с короткими участками и многочисленными местными сопротивлениями.

Метод характеристик сопротивления (Белинский Е.А. [3]) Метод, относящийся к расчету как при равных, так и при неравных перепадах температуры воды в стояках и ветвях  $\Delta t_{\text{ст}} \geq \Delta t_c$  с допустимым отклонением  $\Delta t_{\text{ст}}$  от  $\Delta t_c$  на  $\pm 0,15 \Delta t_c$ . Общая потеря давления (1) на расчетном участке  $\Sigma(Rl+Z)$  при неизменном расходе  $G$  и диаметре трубы  $d$  может быть представлена в виде:

$$P = \left[ A_\partial g \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right) \right] G^2 = S G^2, \text{ Па} \quad (19)$$

где  $S$  – характеристика сопротивления участка, Па/(кг/ч)<sup>2</sup>;  $A_\partial$  – удельное динамическое (скоростное) давление в трубе при расходе  $G=1$  кг/ч плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, Па/(кг/ч)<sup>2</sup>.

Суммарная потеря давлений двух и более последовательно соединенных участков сети с постоянным расходом равна:

$$P = S_1 G^2 + S_2 G^2, \text{ Па}. \quad (20)$$

Отсюда суммарная характеристика последовательно соединенных участков сети с постоянным расходом теплоносителя равна сумме характеристик этих участков.

$$S' = S_1 + S_2, \text{ Па/(кг/ч)}^2. \quad (21)$$

Потери давления в параллельно соединенных участках равны между собой, а суммарный расход на этих участках равен:

$$\Sigma G = G_1 + G_2, \text{ кг/ч}. \quad (22)$$

Суммарная характеристика параллельно соединенных участков определяется по формуле:

$$S' = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} \right)^2}, \text{ Па/(кг/ч)}^2 \quad (23)$$



В результате расчета определяются действительные значения расхода и температуры воды в ветвях, стояках и приборах системы отопления [14]. Гидравлический расчет методом характеристик сопротивления рекомендуется использовать [6] при повышенной скорости движения воды в системе (0,8 м/с и более), когда возможно использование постоянных значений коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$ . При скорости воды 0,3-0,8 м/с, фактический расход воды будет несколько меньше расчетного (на 5-10%), в связи с увеличением коэффициентов гидравлического трения и местного сопротивления. Коэффициент гидравлического трения при ламинарном движении теплоносителя дополнительно возрастает в связи со значительным охлаждением воды в трубах.

Иногда в практике требуется определение расходов на отдельных участках существующей сети при возможных ее изменениях, таких как полное выключение отдельных участков или абонентов. Задачи подобного рода хорошо решаются способом перемещения единицы расхода, предложенного П.Н. Каменевым [1, 7].

За единицу расхода принимается любое значение массы воды, причем её рекомендуется принимать такой, при пропуске которой по участку трубы получались бы небольшие удельные потери на трение. Значение удельных потерь на трение в зависимости от выбранной единицы расхода находят по расчетным номограммам.

Величины расхода жидкости, проходящей по расчетным участкам, определяются на основании неоспоримого равенства потерь давления в параллельно соединенных между собой участках. Данный метод используется, в случае необходимого пересчета существующей сети.

В ходе расчета методом эквивалентных отверстий [7] рассматривается резервуар, в котором находится вода под определенным давлением  $H$ , Па. В резервуаре имеется выходное отверстие  $A$  и в той же горизонтальной плоскости труба. Расход в трубе зависит от состояния поверхности внутренних стенок трубы. При этом давление затрачивается на местные сопротивления и на трение. Считается, что данное отверстие представляет собой такую идеальную насадку, в которой имеется только одно сопротивление на выход. Если в трубе перемещается расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/сек, то можно подобрать такую идеальную насадку, через которую будет проходить тот же расход при одном и том же давлении в резервуаре.

Итак, эквивалентное отверстие данной трубы – это отверстие, которое пропускает в едини-

цу времени при одинаковом давлении такое же количество жидкости, как и данная труба.

Общие потери давления в трубе  $H$ :

$$H = \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2} \rho L = \frac{\lambda}{d} \frac{Q^2}{F^2} \frac{\rho}{2} L, \text{ Па} \quad (24)$$

где  $L$  – полная приведенная длина трубы, м;  $F$  – площадь трубы, м<sup>2</sup>.

### Заклучение

В работе приведены алгоритм расчетов методов гидравлического расчета, предложенных отечественными инженерами и учеными в области гидравлических систем. Обозначены область применения и допущения каждого метода. Следует отметить, что в последнее время гидравлический расчет выполняется с использованием программных средств, следовательно, фактор времени затрачиваемого на расчет является даже не второстепенным, на передний план должны выходить точность и детальность результатов расчетов.

### Список литературы

1. Андриевский А.К. Отопление: уч. пособие для вузов по спец. «Теплогасоснабжение и вентиляция» / Андриевский А.К. под ред. М.И. Курпана. 2-е изд., перераб. и доп. // Мн.: Выш. Школа, 1982. – 364 с.
2. Аше Б.М. Отопление и вентиляция. – Л.: Госстройиздат, 1934.
3. Белинский Е.А. Рациональные системы водяного отопления. – Л.: Госстройиздат, 1963.
4. Еремкин А.И. Тепловой режим зданий: учебное пособие / А.И. Еремкин, Т.И. Королева // Ростов н/Д.: Феникс, 2008.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М., Госэнергоиздат, 1960. – С. 463.
6. Каменев П.Н. и др. Отопление и вентиляция. Ч.1. Отопление, изд. 3-е. – М., Стройиздат, 1975.
7. Каменев П.Н. Расчет однотрубных систем водяного отопления. – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1948.
8. Лейв Ж.Я., Либер И.С., Евдокимова Е.А. Справочник по санитарной технике. – Лениздат: 1966. – 440 с.
9. Лобаев Б.Н. Расчет систем отопления. – Киев: «Будівельник», 1966. – С. 207.
10. Минко В.А. Комплексное проектирование установок центрального водяного отопления зданий жилищно-гражданского назначения / В.А. Минко, Б.Ф. Подпорожных, А.С. Семенов // Белгород, 2009.
11. Огаркова Т.Г. К определению проектного расхода тепла на отопление / Т.Г. Огаркова, Ю.В. Елистратова, А.С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. с. 44-48.
12. Парамонова Е.Ю. Пути снижения теплового загрязнения окружающей среды при централизованном теплоснабжении / Е.Ю. Парамонова, Е.О. Шеремет, А.С. Семенов // Экологические проблемы промышленных городов: сб. научных трудов по материалам 6-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2013. – Ч.1 с. 189-192.
13. Парамонова Е.Ю. Проблема перетопов и недотопов в отопительный период / Е.Ю. Парамонова, Ю.В. Елистратова, А.С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 48-50.
14. Сканин А.Н. Конструирование и расчет систем водяного и воздушного отопления зданий. – М.: Стройиздат, 1977, 135 с.
15. Сканин А.Н., Махов Л.М. Отопление: учебник для вузов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 576 с.
16. Сулов Д.Ю. Биогазовые установки – энергетический резерв строительной индустрии / Д.Ю. Сулов, Л.А. Кушев, Г.Л. Окунева, В.И. Городов // В сборнике: Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов сборник докладов (XIX научные чтения). 2010. С. 246-250.
17. Щекин Р.В. Расчет систем центрального отопления / Р.В. Щекин, В.А. Березовский, В.А. Потапов. – Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1975. – С. 216.