АКАДЕМИЯ КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
имени К. Д. ПАМФИЛОВА

В. К. ДЮСКИН

ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РСФСР

Москва 1950 Ленинград

В книге содержится анализ тепловых и гидравлических режимов двухтрубных и однотрубных систем водяного отопления, с разбором основных причин разрегулировки систем; приводится сравнительная оценка различных систем и указываются мероприятия по повышению тепловой и гидравлической устойчивости отопительных систем.

Книга предназначена для инженерно-технических работников отопительной техники и может быть использована студентами технических ВУЗов при прохождении ими соответствующих разделов курса отопления.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное строительство предъявило к отопительной технике повышенные требования.

Количество проектируемых и монтируемых систем центрального водяного отопления необычайно сильно возросло. Потребовалась глубокая теоретическая разработка многих вопросов отопительной техники.

Советскими теплотехниками профессором Чаплиным В. М., профессором Аше Б. М. и многими другими были составлены по центральным системам отопления первые фундаментальные руководства и отдельные работы, в которых были разобраны наиболее актуальные теоретические вопросы отопительной техники, а также даны практические указания по их выполнению.

Профессору Чаплину В. М. в частности принадлежит приоритет проектирования центральных систем водяного отопления по принципу попутного движения; им же впервые был введен принцип проектирования подающих магистралей на повышенные температуры воды с подмешиванием к ней на вводах обратной воды из отопительных систем.

Широкое развитие в Советском Союзе теплофикации предъявило к отопительным системам дополнительные повышенные требования к качеству их работы, в частности в отношении равномерного прогрева нагревательных приборов и помещений, расположенных в различных этажах и частях здания.

Если при применении в центральных системах водяного отопления индивидуальных котельных в целом ряде случаев можно было достигнуть равномерного прогрева систем некоторым увеличением в них расхода воды, то при теплофикации применение такого способа привело бы к завышению диаметров труб уличных тепловых сетей, к большому перерасходу электроэнергии на работе сетевых насосов и, следовательно, не может быть приемлемым.

В связи с развитием в городах теплофикации выдвигается, поэтому, требование придания отопительным системам боль-

щей тепловой и гидравлической устойчивости. В соответствии с поставленной задачей в настоящей книге содержится анализ тепловых и гидравлических режимов различных систем водяного отопления, дается разбор основных причин их разрегулировки, приводится сравнительная оценка различных систем и указываются мероприятия, способствующие повышению их гидравлической и тепловой устойчивости.

Настоящая книга является лишь первым звеном в этом большом деле. Следует ожидать, что за ней последуют и другие работы большого и высококвалифицированного коллектива советских теплотехников по вопросам режимов работы отопительных систем.

I. ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАФИКОВ

1. Температурные графики отопительных систем

Стационарный режим отапливаемого здания характеризуется следующим равенством:

$$\Sigma K_0 F_0 (t_в - t_н) = 0{,}5 K_п F_п (t_1 + t_2 - 2t_в) = G(t_1 - t_2) \text{ ккал/час}, \quad (1)$$

где: $\Sigma K_0 F_0 (t_в - t_н)$ ккал/час — потери тепла зданием через наружные ограждения;

$0{,}5 K_п F_п (t_1 + t_2 - 2t_в)$ — теплоотдача нагревательных приборов;

$G(t_1 - t_2)$ — теплоотдача воды, протекающей через нагревательный прибор, при температуре ее на входе в прибор t_1 и на выходе из него t_2.

Коэфициент теплопередачи нагревательных приборов K не является постоянным, поскольку он зависит от разности температур нагревательного прибора и окружающего его воздуха.

Если принять для радиаторов зависимость коэфициента теплопередачи от разности температур по формуле:

$$K_п = n (t_1 + t_2 - 2t_в)^{0{,}25},$$

где n — постоянный коэфициент, то уравнение (1) может быть соответственно переписано следующим образом:

$$\Sigma K_0 F_0 (t_в - t_н) = 0{,}5\, n F_п (t_1 + t_2 - 2t_в)^{1{,}25} = G(t_1 - t_2). \quad (1')$$

Во всех тех случаях, когда исследуются не абсолютные значения теплоотдачи нагревательных приборов, а только их относительные величины, приведенную выше зависимость коэфициента теплопередачи нагревательного прибора от разности

температур целесообразно, для упрощения расчетов, заменить следующей линейной зависимостью:

$$K_n = 4{,}6 + 0{,}04 \cdot \Delta t,$$

в которой

$$\Delta t = 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2t_в).$$

В пределах разностей температур, наблюдаемых обычно в водяных системах отопления, размер возможной ошибки при применении приведенной зависимости не превышает 3%.

Введение приведенной выше зависимости значения коэфициента теплопередачи в основное уравнение (1) приводит его к виду:

$$\Sigma K_0 F_0 (t_в - t_н) = 0{,}5 F_n [4{,}6 + 0{,}02 (t_1 + t_2 - 2t_в)] (t_1 + t_2 - 2t_в) = G(t_1 - t_2) \qquad (1'')$$

При заданных и определенных значениях K_0, F_0 и $t_в$ расход тепла на отопление, как показывают приведенные выше уравнения, зависит от температуры наружного воздуха, которой в данном случае он и определяется.

В действительности расход тепла на отопление зависит не только от температуры наружного воздуха, но также и от ряда других причин — влияния ветра, наличия в здании внутренних источников тепла, теплоемкости здания и пр. Так, например, потери тепла зданием при сильном ветре и относительно умеренной наружной температуре могут превосходить потери тепла зданием при температуре наружного воздуха равной расчетной. Следовательно, линейную зависимость расхода тепла системами отопления от температуры наружного воздуха необходимо считать в известной мере условной.

Все написанные выше равенства справедливы для любой температуры наружного воздуха $t'_н$ и температур теплоносителя t'_1 и t'_2, соответствующих этой температуре.

Если принять, что расход воды в системе при всех температурах наружного воздуха остается постоянным (что обычно имеет место в насосных системах, где влияние переменной величины гравитационного напора на расход воды ничтожно), то для двух температур наружного воздуха $t_н$ и $t'_н$ будет справедливо следующее отношение:

$$\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н} = \frac{(t'_1 + t'_2 - 2t_в)^{1{,}25}}{(t_1 + t_2 - 2t_в)^{1{,}25}} = \frac{t'_1 - t'_2}{t_1 - t_2}. \qquad (2)$$

Полученные отношения дают возможность для любой наружной температуры $t'_н$ определить значения t'_1 и t'_2 температур воды на входе и выходе из нагревательных приборов:

$$t'_1 = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2t_в)\left(\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} + \\ + 0{,}5\,(t_1 - t_2)\,\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н}; \qquad (3)$$

$$t'_2 = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2t_в)\left(\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} - \\ - 0{,}5\,(t_1 - t_2)\,\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н}. \qquad (4)$$

Для расчетных температур теплоносителя $t_1 = 95°$ и $t_2 = 70°$ и расчетных внутренних и наружных температур $t_в = 18°$, $t_н = -30°$ уравнения (3) и (4) будут иметь следующие значения:

$$t'_1 = 18 + 2{,}9\,(18 - t'_н)^{0{,}8} + 0{,}26\,(18 - t'_н); \qquad (3')$$

$$t'_2 = 18 + 2{,}9\,(18 - t'_н)^{0{,}8} - 0{,}26\,(18 - t'_н). \qquad (4')$$

Если не учитывать изменений коэфициента теплопередачи отопительных приборов, то в этом случае, согласно уравнению (2), изменение температуры теплоносителя может определяться следующими уравнениями:

$$t'_1 = t_в + (t_1 - t_в)\,\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н};$$

$$t'_2 = t_в + (t_2 - t_в)\,\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н}. \qquad (5)$$

Для указанных выше расчетных условий уравнения (5) будут иметь следующие значения:

$$t'_1 = 18 + 1{,}60\,(18 - t'_н);$$

$$t'_2 = 18 + 1{,}08\,(18 - t'_н). \qquad (5')$$

Для систем водяного отопления с расчетными параметрами теплоносителя 90° и 70° уравнения (3) и (4) будут иметь следующие значения:

$$t_1' = 18 + 2{,}8\,(18 - t_н')^{0{,}8} + 0{,}21\,(18 - t_н'); \qquad (3'')$$

$$t_2' = 18 + 2{,}8\,(18 - t_н')^{0{,}8} - 0{,}21\,(18 - t_н'). \qquad (4'')$$

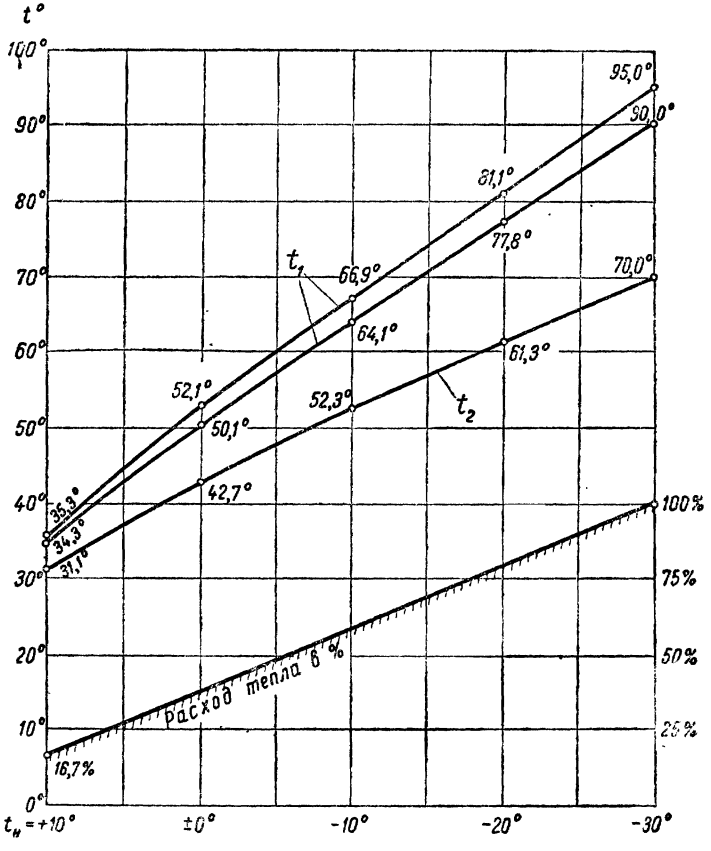


Рис. 1. Отопительный график при постоянном расходе воды (насосная система) $t_н = -30°$, $t_в = 18°$

Полученные в результате произведенных расчетов значения температур воды в подающих и обратных трубах показаны на рис. 1.

Обращает на себя внимание то, что в обоих графиках, имеющих при расчетной температуре наружного воздуха (– 30°) температурный перепад в 25° и в 20°, при более высоких температурах происходит резкое сокращение этих перепадов.

Следует отметить, что температурные перепады воды обусловливают ее расход в системе, а также расход электроэнергии на работу сетевых насосов, и, следовательно, увеличение температурного перепада теплоносителя в периоды высоких температур наружного воздуха является весьма желательным.

В обычных насосных системах при повышении температуры наружного воздуха до +10° и сокращении расхода тепла до 16,7% от расчетной величины расход воды в системе продолжает оставаться неизменным, что не всегда может считаться достаточно обоснованным.

Системы водяного отопления с естественной циркуляцией имеют, в отличие от насосных систем, переменный расход воды, обусловливаемый тем, что с повышением температуры наружного воздуха и соответственным снижением температуры воды в подающих трубопроводах в системе уменьшается температурный перепад воды, а следовательно, уменьшается и действующий циркуляционный напор. Это приводит к уменьшению в ней и расхода воды.

Переменный расход воды в системах с естественной циркуляцией видоизменяет решение исходных уравнений (2) следующим образом:

$$\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н} = \frac{(t'_1 + t'_2 - 2t_в)^{1,25}}{(t_1 + t_2 - 2t_в)^{1,25}} = \frac{G'(t'_1 - t'_2)}{G(t_1 - t_2)}. \qquad (6)$$

Третьим уравнением, определяющим неизвестные t'_1, t'_2 и G', может быть уравнение изменения расхода воды от действующего в системе циркуляционного напора, который зависит от разности объемных весов воды в подающих и обратных трубах, в соответствии с чем может быть составлено следующее уравнение:

$$G'^2 = G^2 \frac{\gamma'_2 - \gamma'_1}{\gamma_2 - \gamma_1}, \qquad (7)$$

в котором: γ_1 и γ_2 — объемный вес воды в подающих и обратных трубах при расчетной температуре наружного воздуха, *кг/м*³;

γ'_1 и γ'_2 — тот же вес воды при температуре наружного воздуха, отличающейся от расчетной.

После подстановки найденного значения расхода воды в основное исходное уравнение (6) можно получить:

$$\frac{t_в - t'_н}{t_в - t_н} = \frac{(t'_1 + t'_2 - 2t_в)^{1,25}}{(t_1 + t_2 - 2t_в)^{1,25}} = \frac{(t'_1 - t'_2)(\gamma'_2 - \gamma'_1)^{0,5}}{(t_1 - t_2)(\gamma_2 - \gamma_1)^{0,5}}. \qquad (8)$$

Вес воды может быть выражен в функции от ее температуры следующим образом:

$$\gamma_t = 1000{,}3 - 0{,}06\,t - 0{,}0036\,t^2 \qquad (9)$$

и несколько более просто по формуле:

$$\gamma_t = 1019 - 0{,}6\,t. \qquad (10)$$

Если зависимость веса воды от температуры принять по уравнению (10), то очевидно·

$$\frac{\gamma_2' - \gamma_1'}{\gamma_2 - \gamma_1} = \frac{t_1' - t_2'}{t_1 - t_2}, \qquad (11)$$

в соответствии с чем можно получить:

$$t_1' = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2\,t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} + 0{,}5\,A^{2/3}$$

и, соответственно: (12)

$$t_2' - t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2\,t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} - 0{,}5\,A^{2/3},$$

где $A = (t_1 - t_2)^{1{,}5}\,\dfrac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}$.

Если в основу приведенных расчетов принять зависимость веса воды от ее температуры по уравнению (9), то получатся кривые, изображенные на рис. 2, построенные по следующим уравнениям:

$$t_1' = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2\,t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} + 0{,}5\,A^{2/3}C^{-1/3};$$

$$t_2' = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2\,t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} - 0{,}5\,A^{2/3}C^{-1/3}.$$

Здесь: (13)

$$A = (t_1 - t_2)\left[0{,}0036\,(t_1'^2 - t_2'^2) + 0{,}06\,(t_1 - t_2)\right]^{0{,}5}\,\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н};$$

$$C = 0{,}06 + 0{,}0036\left[(t_1 + t_2 - 2\,t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} + 2\,t_в\right].$$

Изменение расхода воды в гравитационных системах отопления определяется найденными температурами воды в подающих и обратных трубах.

В общем виде уравнение, определяющее расход воды гравитационных систем отопления, можно получить решением уравнения (6).

После подстановки в указанное уравнение значения найденной выше разности температур получается окончательное выражение для определения расхода воды в гравитационных си-

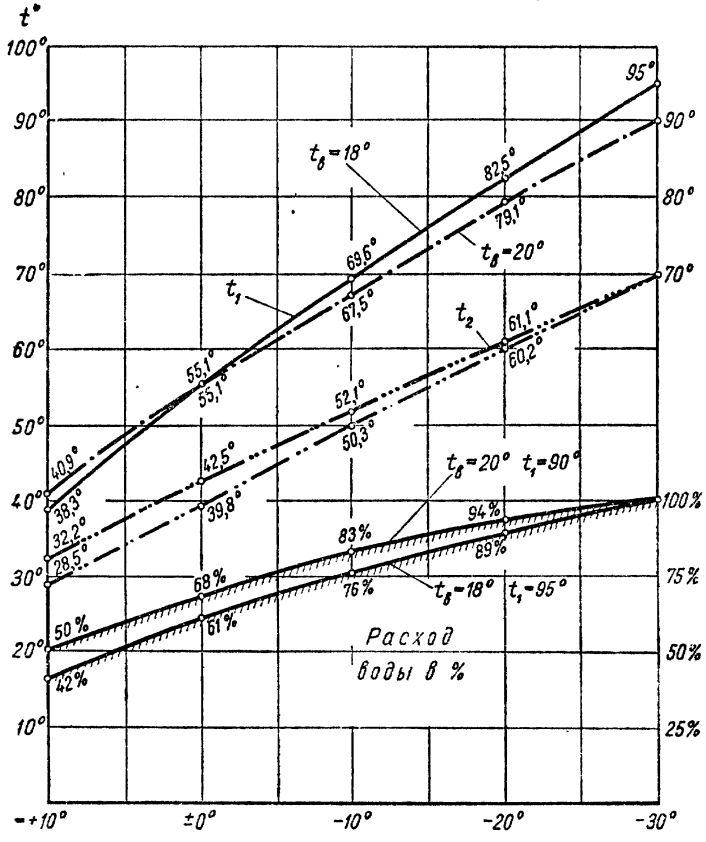


Рис. 2. Отопительный график при переменном расходе воды (гравитационная система) $t_н = -30°$, $t_в = 18°$ и $20°$

стемах отопления в зависимости от ее постоянных параметров и заданной наружной температуры:

$$G' = G\frac{(t_1 - t_2)(t_в - t'_н)C^{1/3}}{A^{2/3}(t_в - t_н)}. \qquad (14)$$

Найденные значения температур и расходов воды для систем с расчетными температурами $t_1 = 95°$, $t_2 = 70°$, $t_в = 18°$, а также $t_1 = 90°$, $t_2 = 70°$ и $t_в = 20°$ (системы, смонтированные более тридцати лет назад) показаны на графике (рис. 2).

График показывает, что в этих гравитационных системах при повышении температуры наружного воздуха до +10° расход воды сокращается в одном случае до 42% от расчетного расхода воды и до 50% в другом.

Оба графика рис. 2 могут быть, естественно, температурными графиками не только гравитационных систем, но также и насосных, если поддерживать расход воды в них по кривым расхода воды этих графиков.

Поддерживание переменного расхода воды в насосных системах может быть осуществлено дросселированием задвижки у насоса, однако такое регулирование, как известно, не дает значительного снижения расхода электроэнергии.

Более целесообразной для насосных систем является установка двух разных насосов — на полный расход воды и на 75% его от расчетного; последний насос будет работать при более высоких температурах наружного воздуха.

При работе насоса с расходом воды 75% от расчетного требуемый напор сокращается до 56% от расчетного напора, а мощность мотора насоса сокращается до 42%. Расход электроэнергии сокращается в этом случае более чем в два раза.

В больших районных системах теплофикации таких ступеней расходов воды должно быть не менее трех: 60, 80 и 100%, которым будут отвечать мощности насосов в 22, 51 и 100%.

Все насосы в известной мере могут заменять друг друга и потому отпадает надобность в установке резервных насосов.

Ступенчатый переход системы с одного расхода воды на другой обусловливает необходимость применения и ступенчатого графика температур.

Температурный график насосной системы с переменным расходом воды может быть построен по уравнениям (1), в которых должна быть учтена переменность расхода воды.

Совместное решение этих уравнений дает возможность получить в общем виде определение температур теплоносителя как на входе в нагревательные приборы, так и на выходе из них при любом заданном соотношении расходов воды:

$$t_1' = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2' - 2t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} + \\ + 0{,}5\,(t_1 - t_2)\frac{G}{G'} \cdot \frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н};$$

$$t_2' = t_в + 0{,}5\,(t_1 + t_2 - 2t_в)\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0{,}8} - \qquad (15)$$

$$-0{,}5\,(t_1-t_2)\,\frac{G}{G'}\cdot\frac{t_в-t'_н}{t_в-t_н}.$$

При $t_1=95°$, $t_2=70°$, $t_в=18°$, $t_н=-30°$, $\frac{G'}{G}=n$:

$$t'_1=18+2{,}9\left(18-t'_н\right)^{0{,}8}+0{,}26\left(18-t'_н\right)\cdot n^{-1};$$
$$t'_2=18+2{,}9\left(18-t'_н\right)^{0{,}8}-0{,}26\left(18-t'_н\right)\ n^{-1}. \qquad (15')$$

В тепловых сетях обычно применяются (в целях сокращения и капитальных затрат и эксплоатационных расходов) более высокие температуры теплоносителя, чем этого требует домовая система водяного отопления.

Требующаяся в этом случае температура теплоносителя для домовой системы достигается смешением воды, поступающей из тепловых сетей с водой из обратных труб домовой системы. Температура поступающей в систему воды определяется равенством:

$$t_1=\frac{t_c\,G_1+t_2\,G_2}{G_1+G_2}, \qquad (16)$$

в котором: t_c и G_1 — температура теплоносителя и расход воды тепловых сетей;

t_2 и G_2 — температура и расход подмешиваемой воды из местной системы.

Если принять, что $G_2=aG_1$, где a — коэфициент смешения, то нетрудно вывести, что:

$$t_1=\frac{t_c+at_2}{a+1}\quad\text{и}\quad a=\frac{t_c-t_1}{t_1-t_2}. \qquad (17)$$

Из полученных равенств легко вывести значение средней температуры нагревательного прибора:

$$t_{ср}=\frac{t_1+t_2}{2}=\frac{t_c+(2a+1)\,t_2}{2\,(a+1)}. \qquad (18)$$

Полученное значение средней температуры нагревательного прибора необходимо подставить в уравнение (6), которое после проведения преобразований примет вид:

$$\frac{t_в-t'_н}{t_в-t_н}=\frac{\left[\,t'_c+(2a+1)\,t'_2-2\,(a+1)\,t_в\,\right]^{1{,}25}}{\left[\,t_c+(2a+1)\,t_2-2\,(a+1)\,t_в\,\right]^{1{,}25}}=\frac{G'\left(t'_c-t'_2\right)}{G\left(t_c-t_2\right)}. \qquad (19)$$

Решением приведенных уравнений можно получить следующие выражения для определения температур теплоносителя в подающих и обратных трубах t_c' и t_2':

$$t_c' = t_в + \left[\frac{t_c + (2a+1)t_2}{2(a+1)} - t_н\right]\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0,8} + \\ + \frac{(2a+1)G(t_c - t_2)(t_в - t_н')}{2(a+1)G'(t_в - t_н)}, \qquad (20)$$

$$t_2' = t_в + \left[\frac{t_c + (2a+1)t_2}{2(a+1)} - t_в\right]\left(\frac{t_в - t_н'}{t_в - t_н}\right)^{0,8} - \frac{G(t_c - t_2)(t_в - t_н')}{2G'(a+1)(t_в - t_н)},$$

где и G и G' — расчетный и измененный расходы воды в системе.

При расчетных параметрах $t_c = 130°$, $t_2 = 70°$, $t_в = 18°$, $t_н = -30°$, $a = 1{,}4$ и $\frac{G'}{G} = n$ уравнения (20) будут иметь следующие значения:

$$t_c' = 18 + 2{,}9\left(18 - t_н'\right)^{0,8} + 0{,}99\left(18 - t_н'\right)\cdot n^{-1},$$

$$t_2' = 18 + 2{,}9\left(18 - t_н'\right)^{0,8} - 0{,}26\left(18 - t_н'\right)\cdot n^{-1}. \qquad (21)$$

Найденные уравнения дают возможность построить температурный график для любых расчетных температур и при любом изменении расхода воды. Построенные по данным уравнениям графики показаны на рис. 3.

Представленные на рис. 2 и 3 графики температур воды рассчитаны на определенную внутреннюю температуру 18 или 20°, следовательно, все нагревательные приборы, установленные в помещениях, имеющих иную температуру, будут получать при промежуточных температурах наружного воздуха воду с не соответствующей им температурой.

Последнее наглядно иллюстрируется рис. 4, из которого видно, что все системы с внутренней расчетной температурой, не равной 18°, имеют необходимую им температуру теплоносителя только в одной точке при $t_н = -30$. Максимальное расхождение температур теплоносителя получается, естественно, в начале и в конце отопительного сезона, т. е. при $t_н' = +10°$.

Определение размеров отклонений внутренних температур

от температур, предусмотренных нормами, возможно произвести решением основной системы уравнений теплового режима:

$$\frac{t'_в - t'_н}{t_в - t_н} = \frac{(t'_1 + t'_2 - 2t'_в)}{(t_1 + t_2 - 2t_в)} = \frac{t'_1 \quad t'_2}{t_1 - t_2}, \tag{22}$$

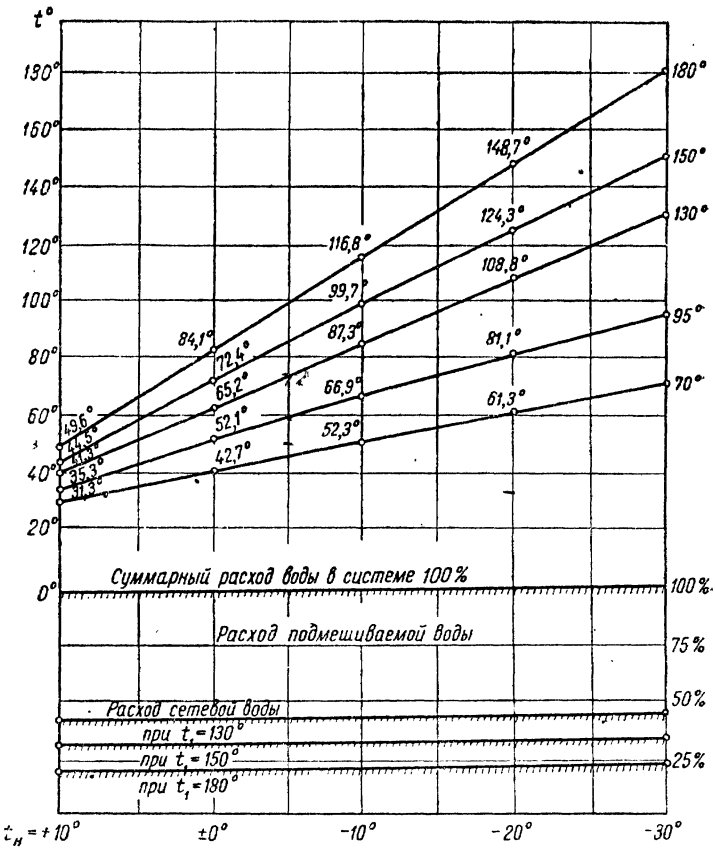


Рис. 3. Отопительный график с повышенными температурами теплоносителя при постоянном расходе воды

откуда

$$t'_в = \frac{t'_1 (t_в - t_н) + (t_1 - t_в) t'_н}{(t_1 - t_н)}. \tag{23}$$

Для упрощения коэфициент теплопередачи нагревательных приборов принят здесь постоянным, что в данном случае допустимо, поскольку переменное значение этого коэфициента не изменит конечных результатов.

Найденное уравнение дает возможность определить ту внутреннюю температуру помещения, которая в нем установится,

если температура теплоносителя не будет соответствовать расчетным условиям.

Так, например, для $t_в = 22°$, $t_н = -30°$, $t_1 = 95°$, $t'_н = +10°$ и $t'_1 = 31°$

$$t'_в = \frac{31 \times 52 + 73 \times 10}{125} = 18{,}7°.$$

Для $t_в = 16°$

$$t'_в = \frac{31 \times 46 + 79 \times 10}{125} \approx 17{,}7°.$$

Подобным же образом нетрудно определить истинную температуру помещения с $t_в \neq 18°$ при любой температуре наружного воздуха.

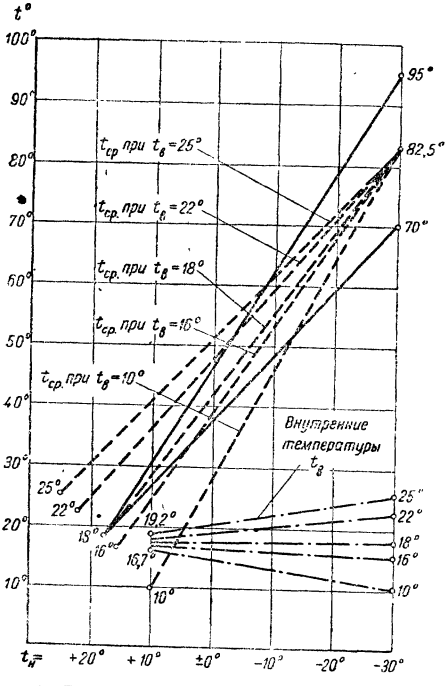


Рис. 4. Температурные графики для помещений с расчетной внутренней температурой $t_в$ = 25, 22, 18, 16 и 10°

Из рис. 4 видно, что в подобных помещениях диапазон колебания внутренних температур при расчетной температуре наружного воздуха составляет 15°, а при повышении температуры наружного воздуха до +10° сокращается до 2,5°.

Естественно, возникает вопрос, в какой мере и каким образом возможно (и возможно ли вообще) поддерживание требуемых нормами внутренних температур в течение всего отопительного сезона.

При решении этого вопроса возможны три случая:

а) внутренняя температура, отличающаяся от 18°, необходима для нескольких помещений;

б) указанная внутренняя температура требуется для всего здания, присоединенного к тепловым сетям, работающим с нормальным температурным графиком без смешения;

в) указанная внутренняя температура требуется для всего здания, присоединенного к тепловым сетям с повышенными температурами теплоносителя.

Первый случай регулирования температуры практически

трудно осуществим, поскольку он требует применения местной регулировки, возможности которой ограничены. Кроме того, как известно, местное регулирование одного из нагревательных приборов всегда приводит к разрегулировке соседних приборов.

Во втором случае, когда внутренняя температура, отличающаяся от 18°, требуется для всей системы в целом, некоторая ее подрегулировка могла бы быть осуществлена за счет соответствующего увеличения или уменьшения расхода воды в системе. Однако такая регулировка может дать изменения внутренних температур только в небольших пределах; поэтому в обоих рассматриваемых случаях более целесообразно рассчитывать нагревательные приборы на среднезимнюю температуру теплоносителя.

В системах теплофикации, работающих с повышенными температурами теплоносителя, изменение температуры воды в подающих трубах отопительных систем с внутренней температурой, отличающейся от 18°, может быть осуществлено путем изменения коэфициента смешения в элеваторном узле.

Искомый коэфициент смешения a' в элеваторном узле может быть найден из выражения:

$$a' = \frac{t'_c - t'_1}{t'_1 - t'_2}, \qquad (24)$$

в котором: t'_c — температура воды в подающих магистралях тепловых сетей, являющаяся в данном случае заданной;

t'_1 и t'_2 — температуры воды в подающих и обратных трубах местной системы (неизвестные).

Зависимость коэфициента смешения от рассматриваемой температуры наружного воздуха $t'_н$ и найденных выше температур местной системы t'_1 и t'_2 определится следующим уравнением:

$$a' = \frac{(t'_c - t_в)(t_в - t_н) - (t_1 - t_в)(t_в - t'_н)}{(t_1 - t_2)(t_в - t'_н)}. \qquad (25)$$

При $t'_н = +10°$, $t_в = 20°$, $t_н = -30°$, $t_1 = 95°$, $t_2 = 70°$ и $t'_c = 37°$

$$a' = \frac{17 \times 50 - 75 \times 10}{25 \times 10} = 0{,}4.$$

Полученный результат показывает, что для того, чтобы в системе, рассчитанной на внутреннюю температуру 20° (например, в больницах), эта температура поддерживалась на всем диапазоне наружных температур, необходимо с повышением наружных температур постепенно уменьшать коэфициент смешения (с 1,4 при наружной температуре — 30° до 0,4 при наружной температуре + 10°).

Уменьшение коэфициента смешения может быть осуществлено постепенным прикрытием задвижки или вентиля на перемычке.

Расход сетевой воды должен при этом, естественно, постепенно увеличиваться. Размер увеличения может быть найден из уравнения, определяющего расход воды в местной отопительной системе.

Если предположить, что расход воды в отопительной системе в течение всего отопительного сезона должен остаться неизменным, то в этом случае должно быть соблюдено равенство:

$$G_c(1+a) = G_c'(1+a'),$$

где G_c и G_c' — расходы сетевой воды при расчетной температуре наружного воздуха и при любой другой, для которой определяются тепловой режим и коэфициент смешения.

Из приведенного равенства

$$G_c' = G_c \frac{1+a}{1+a'};$$

при $a = 1{,}4$ и $a' = 0{,}4$

$$G_c' = \frac{2{,}4}{1{,}4} G_c \approx 1{,}7 G_c.$$

Полученный результат показывает, что в зданиях, рассчитанных на внутреннюю температуру $+20°$ и присоединенных к городским тепловым сетям, расход сетевой воды при наружной температуре $+10°$ должен быть на 70% больше расчетного, что может быть достигнуто постепенным открытием задвижки на подающей трубе тепловых сетей. Контроль за правильностью установленного расхода воды может быть осуществлен либо по водомеру, либо по показаниям термометров.

Для объектов с пониженными температурами помещений необходимо было бы, наоборот, увеличивать коэфициент смешения с повышением температур наружного воздуха, что практически почти невозможно. Поэтому для подобных объектов единственным способом регулировки является уменьшение расхода воды и отопление с пропусками.

II. ВЕРТИКАЛЬНАЯ РАЗРЕГУЛИРОВКА ДВУХТРУБНЫХ СИСТЕМ

1. Охлаждение воды в трубах

Температура воды в подающих трубах отопительной системы не остается постоянной. По ходу теплоносителя, в особенности при открытой прокладке неизолированных труб внутри помещения, температура эта заметно снижается, в соответствии

с чем снижается и средняя температура воды в более удаленных нагревательных приборах. Для получения в этих условиях в помещении нормальной внутренней температуры поверхность нагрева этих отопительных приборов должна быть увеличена.

В связи с этим ОСТ 90036-39 предусматривает введение соответствующих надбавок на поверхности нагревательных приборов. Эти надбавки для двухтрубных систем с верхней разводкой и открытой прокладкой стояков приведены в табл. 1.

В табл. 1 в числителе даны надбавки для приборов в системах с естественной циркуляцией, а в знаменателе — в насосных системах.

Таблица 1

Надбавка на поверхность нагрева отопительных приборов, учитывающая остывание воды в трубах, %

Этаж, на котором находится данный прибор	Этажность здания				
	2	3	4	5	6
1	$\frac{10}{5}$	$\frac{15}{5}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{25}{10}$
2	—	$\frac{5}{0}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{15}{5}$
3	—	—	$\frac{5}{0}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{10}{5}$
4	—	—	—	—	$\frac{5}{0}$

Табл. 1 показывает, что действующий в настоящее время ОСТ требует применения надбавок уже в двухэтажных домах. Нагревательные приборы системы с естественной циркуляцией в первых этажах шестиэтажных домов должны быть увеличены на 25%.

Следует определить, насколько чувствительны системы водяного отопления к понижениям в трубах температуры теплоносителя.

Если пренебречь изменением коэфициента теплопередачи нагревательных приборов, что в данном случае вполне допустимо, то из условий равновесия теплового режима системы для одной и той же температуры наружного воздуха, но разной начальной температуры теплоносителя можно получить два следующих равенства:

$$\frac{t_в' - t_н}{t_в - t_н} = \frac{t_1' + t_2' - 2t_в'}{t_1 + t_2 - 2t_в} = \frac{G'(t_1' - t_2')}{G(t_1 - t_2)}. \qquad (26)$$

Решение написанных равенств относительно внутренней температуры помещения при постоянном расходе воды в системе приводит к следующему результату:

$$t_в' = \frac{(t_1 - \Delta t)(t_в - t_н) + (t_1 - t_в)\, t_н}{t_1 - t_н}, \qquad (27)$$

где Δt — охлаждение воды в трубопроводах.

При $t_1 = 95°$, $t_в = 18°$ и $t_н = -30°$ внутренняя температура помещения определится с некоторым округлением следующим уравнением:

$$t'_в \doteq 18 - 0{,}4\Delta t. \qquad (28)$$

Полученный результат показывает, что изменение температуры теплоносителя существенно отражается на изменении температуры помещения; каждый градус охлаждения воды в трубах влечет за собой снижение внутренней температуры помещения на 0,4°.

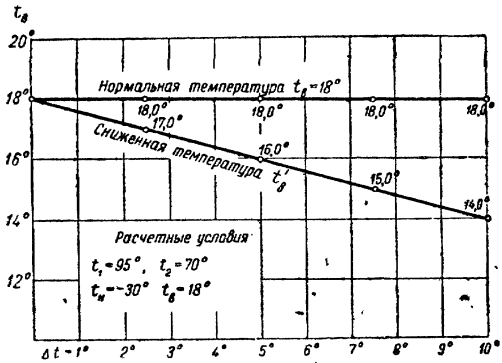


Рис. 5. График понижения внутренней температуры

Если в уравнение (27) подставить другую, отличающуюся от расчетной, температуру наружного воздуха и соответствующую температуру теплоносителя, то нетрудно убедиться, что в результате этого уравнение, определяющее внутреннюю температуру помещения, останется неизменным. Снижение внутренней температуры помещения не зависит, следовательно, от температуры наружного воздуха и начальной температуры теплоносителя, являясь для заданных расчетных условий постоянным.

Как известно, в многоэтажных системах водяного отопления охлаждение воды в трубах может доходить до 10 и более градусов, следовательно, и понижение внутренней температуры помещения может быть в этом случае весьма значительным.

Зависимость понижения внутренней температуры от охлаждения воды в трубах показана на рис. 5.

Размер необходимого увеличения поверхности нагрева приборов, обусловливаемый охлаждением воды в стояках, может быть определен из уравнений теплоотдачи нагревательных приборов.

При заданной одной и той же теплоотдаче двух нагревательных приборов, когда в один из них вода поступает с температурой непосредственно равной расчетной, а в другой — с температурой более низкой в результате охлаждения воды в трубопроводах, должно иметь место равенство:

$$0{,}5\, K_1 F_1 (t_1 + t_2 - 2t_в) = 0{,}5\, K_2 F_2 \left(t'_1 + t'_2 - 2t_в\right).$$

После замены коэфициента теплопередачи известной зависимостью его от разности температур и учитывая, что темпе-

ратурный перепад теплоносителя во всех приборах должен быть одним и тем же, можно получить следующее уравнение, определяющее соотношение поверхности нагрева отопительных приборов:

$$F_2 = F_1 \frac{(t_1 + t_2 - 2t_в)^{1,25}}{(t_1 + t_2 - 2\Delta t - 2t_в)^{1,25}}. \qquad (29)$$

Найденное уравнение дает возможность определить требуемое увеличение поверхности нагрева прибора при любой степени охлаждения воды в трубах.

Для системы с обычными расчетными температурами $t_1 = 95°$, $t_2 = 70°$ и $t_в = 18°$ уравнение (29) принимает вид:

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{435}{(129 - 2\Delta t)^{1,25}}.$$

При $\Delta t = 1°$ $F_2 = 1{,}02 F_1$, при $\Delta t = 5°$ $F_2 = 1{,}11 F_1$, при $\Delta t = 10°$ $F_2 = 1{,}235 F_1$ и т. д.

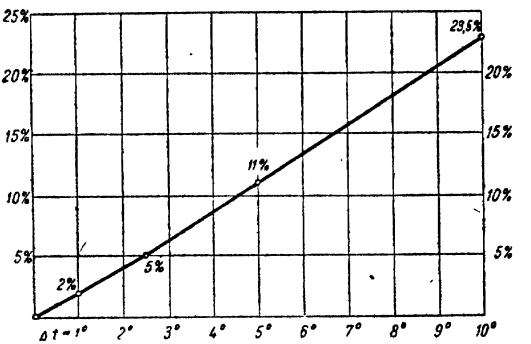


Рис. 6. График требуемого увеличения поверхности отопительного прибора в зависимости от охлаждения воды в трубах

На основании полученных данных на рис. 6 построена кривая необходимого увеличения поверхности нагрева прибора в зависимости от охлаждения воды в стояках.

Рассмотрение этой кривой показывает, что предусматриваемые ОСТом добавки на приборы в 5 и 10% достаточны при охлаждении воды в стояке в первом случае не более чем на 2,5° и во втором не более чем на 4,7°. При понижении температуры теплоносителя на 10° требуемое увеличение поверхности прибора составляет 23,5%.

Полученный результат показывает, насколько внимательно следует относиться при проектировании отопительных систем к возможному охлаждению воды в трубопроводах.

2. Остаточные напоры при верхней разводке

Гидравлический расчет трубопроводов системы водяного отопления базируется прежде всего на необходимости применения стандартных диаметров труб и затем на установившейся практике применения в указанных системах труб диаметром не менее 15,75 *мм* ($^1/_2$″).

Переходы в трубопроводах с одного диаметра на другой предусматриваются обычно в местах установки крестовин и

тройников для присоединения к стоякам нагревательных приборов.

Участки труб в стояках между этажами делают без изменения их в диаметре.

Все изложенное приводит, естественно, к тому, что располагаемые напоры по отдельным расчетным кольцам — по стоякам и этажам — не соответствуют получающимся в них расчетным гидравлическим сопротивлениям, в соответствии с чем в отдельных расчетных кольцах образуются так называемые остаточные напоры, поглощение которых возлагается на регулировочные краны.

Для выявления положения, получающегося фактически при гидравлическом расчете двухтрубных систем, ниже приводится пример гидравлического расчета двух стояков (крайнего и ближнего) двухтрубной тупиковой системы водяного отопления в здании с шестью этажами (рис. 7).

В расчете принято: расстояние между стояками — 8,0 *м*, высота этажей — 3,4 *м*, расстояние от стояка до прибора — 1,2 *м*, теплоотдача приборов верхних и нижних этажей — 1000 *ккал/час*, теплоотдача каждого прибора в средних этажах — 800 *ккал/час*. Расходы воды по отдельным участкам труб выписаны на рис. 7.

Предполагается также, что в результате произведенного гидравлического расчета по прибору первого этажа наиболее удаленного стояка *1* приняты диаметры труб, показанные на рис. 7.

Сопротивления, которые получаются на отдельных участках при заданных расходах воды и принятых диаметрах труб, приведены для стояка в табл. 2 и для магистралей — в табл. 3.

Таблица 2

G кг/час	40	80	144	208	272	336	416
∅ дм.	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4	1
R мм вод.ст/пог.м	0,5	1,8	5,8	2,5	4,2	6,5	2,7

Таблица 3

G кг/час	416	832	1248	1664	2080
∅ дм.	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2
R мм вод.ст/пог.м	2,7	2,5	5,5	4,5	7,0

Если для упрощения принять длину всех участков труб одинаковой (3,4 *м*), а местные сопротивления равными линейным сопротивлениям от трения, то общее сопротивление всех участков труб первого стояка по кольцу первого этажа будет следующим:

$$\Sigma (Rl + Z)_1 = (2{,}7 + 6{,}5 + 4{,}2 + 2{,}5 + 5{,}8 + 1{,}8 + 0{,}5)\, 2 \times 3{,}4 = 163{,}2 \text{ мм вод. ст.}$$

Принятое в расчете некоторое увеличение длины подводок к нагревательному прибору должно компенсировать имеющиеся в этих участках повышенные местные сопротивления.

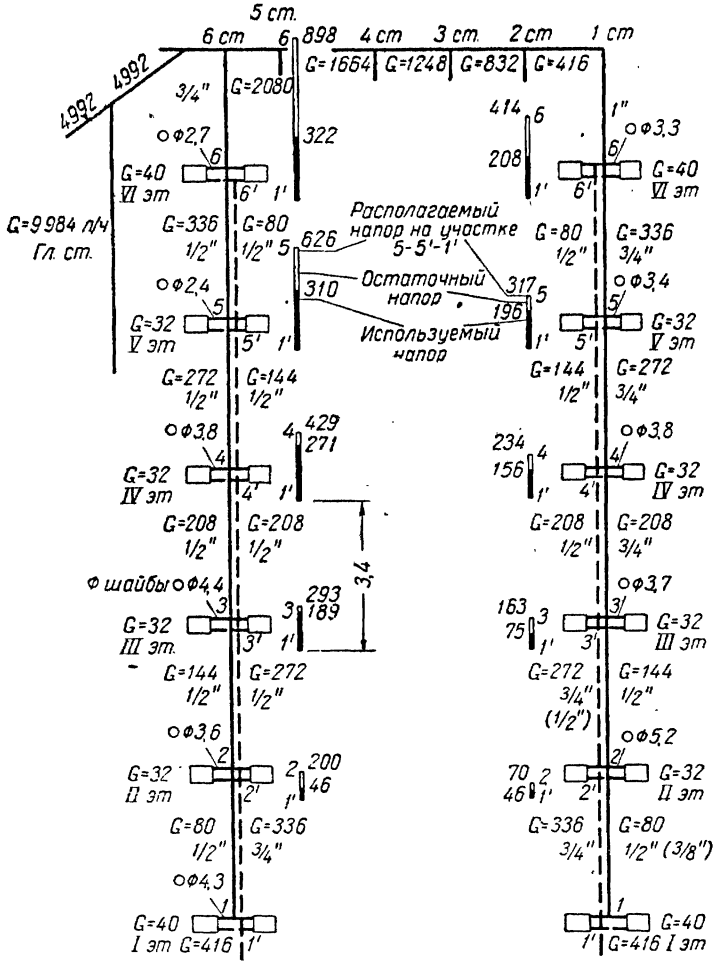


Рис. 7. Схема двухтрубной шестиэтажной системы с верхней разводкой

Если рассматриваемый стояк рассчитать с учетом фактических местных сопротивлений, считая на каждом участке стояка $\Sigma\xi = 4{,}0$ и на участках труб, присоединяющих нагревательный прибор к стояку, $\Sigma\xi = 15$, то во всем стояке величина местных сопротивлений по кольцу прибора первого этажа будет следующей:

$$Z = 8{,}4 + 14{,}4 + 9{,}2 + 5{,}5 + 8{,}8 + 2{,}8 + 2{,}7 + 8{,}4 = 60{,}2 \text{ мм вод. ст.}$$

Величина сопротивлений от трения

$$\Sigma\ Rl = (2{,}7 + 6{,}5 + 4{,}2 + 2{,}5 + 5{,}8 + 1{,}8) \times 3{,}4 + 0{,}5 \times 2{,}4 + 2{,}7 \times 1 =$$

$$= 83{,}8 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Полное сопротивление стояка будет, следовательно, следующим:

$$\Sigma Rl + Z = 60{,}2 + 83{,}8 = 144{,}0 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.,$$

что на 12% меньше по сравнению с приближенным расчетом.

Принятый приближенный расчет дает, следовательно, некоторое завышение гидравлической характеристики стояка, а следовательно, и некоторую его бо́льшую гидравлическую устойчивость по сравнению с фактической.

При определении диаметров труб обратного стояка после прибора второго этажа требуется соблюдение равенства:

$$H_{II} = \Sigma\,(Rl_1 + Z)_{1\,эт} + h_2\,\Delta\gamma \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.,$$

где:

H_{II} — располагаемый напор прибора второго этажа, подлежащий погашению на участке 2—2′—1′, *мм вод. ст.*;

$\Sigma\,(Rl + Z)_{1\,эт}$ — сопротивление трубопроводов прибора первого этажа на участке 2—1—1′, *мм вод. ст.*;

$h_2\,\Delta\gamma$ — дополнительный гравитационный напор от прибора второго этажа, *мм вод. ст.*

По найденному ранее

$$H_{II} = (1{,}8 + 0{,}5) \times 2 \times 3{,}4 + 3{,}4 \times 15{,}9 = 70 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Сопротивление трубопроводов на участке 2—2′—1′ при диаметре обратного стояка, равном $^3/_4''$, и диаметре подводки $^1/_2''$ будут следующими:

$$\Sigma\,(Rl + Z)_{2\,эт} = (0{,}3 + 6{,}5) \times 2 \times 3{,}4 = 46 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Полученный результат показывает, что уже во втором этаже часть циркуляционного напора остается неиспользованной.

В избытке

$$\Delta H_{II} = H_{II} - R_{II} = 70 - 40 = 24 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Подобным же образом можно установить соотношение располагаемых напоров и сопротивлений и по всем другим этажам.

Для прибора третьего этажа на участках 3—3′—2′—1′ будет иметь место располагаемый напор:

$$H_{III} = 2 \times (5{,}8 + 1{,}8 + 0{,}5) \times 3{,}4 + 6{,}8 \times 15{,}9 = 163 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Сопротивление участков 3—3′—2′—1′ при диаметре трубы участка 3′—2′, равного $^3/_4''$, будет следующим:

$$\Sigma\,(Rl + Z)_{3\,эт} = (0{,}3 + 4{,}2 + 6{,}5) \times 2 \times 3{,}4 = 75 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

В избытке

$$\Delta H_{III} = 163 - 75 = 88 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Для четвертого этажа на участках 4—4′—1′

$$H_{IV} = 2 \times (2{,}5 + 5{,}8 + 1{,}8 + 0{,}5) \times 3{,}4 + 10{,}2 \times 15{,}9 = 234 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.,$$

$$\Sigma\,(Rl + Z)_{4\,эт} = 2 \times (0{,}3 + 12 + 4{,}2 + 6{,}5) \times 3{,}4 = 156 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.,$$

$$\Delta H_{IV} = 234 - 156 = 78 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Для пятого этажа

$$H_V = 2 \times (4{,}2 + 2{,}5 + 5{,}8 + 1{,}8 + 0{,}5) \times 3{,}4 + 13{,}6 \times 15{,}9 = 317 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{5\text{эт}} = 2 \times (0{,}3 + 5{,}8 + 12 + 4{,}2 + 6{,}5) \times 3{,}4 = 196 \text{ мм вод. ст};$$

$$\Delta H_V = 317 - 196 = 121 \text{ мм вод. ст.}$$

Для шестого этажа

$$H_{VI} = 2 \times (6{,}6 + 4{,}2 + 2{,}5 + 5{,}8 + 1{,}8 + 0{,}5) \times 3{,}4 + 17 \times 15{,}9 = 414 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{6\text{эт}} = 2 (0{,}3 + 1{,}8 + 5{,}8 + 12 + 4{,}2 + 6{,}5) \times 3{,}4 = 208 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{VI} = 414 - 208 = 206 \text{ мм вод. ст.}$$

Полученные результаты показывают, что по всем этажам (естественно, кроме первого) располагаемые напоры оказались неиспользованными, в частности в шестом этаже остаток неиспользованного напора составляет 50%.

Для расчета стояка *6* необходимо знать сопротивление магистралей (подающих и обратных) между стояками *6* и *1*; при принятых в схеме диаметрах труб и их длинах (если принять увеличение последних для компенсации местных сопротивлений в размере 50%) указанные сопротивления составят:

$$H = (2{,}7 + 2{,}5 + 5{,}5 + 4{,}5 + 7{,}0) \times 8 \times 2 \times 1{,}5 = 532 \text{ мм вод. ст.}$$

Полный располагаемый напор для шестого стояка будет следующим:

$$H_6 = 532 + 163 = 695 \text{ мм вод. ст.}$$

В соответствии с располагаемым напором в шестом стояке расходы воды по отдельным участкам, диаметры и удельные потери напора показаны в табл. 4.

Таблица 4

G кг/час	40	80	144	208	272	336	416
Ø дм.	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	3/4
R мм вод. ст/пог. м	0,5	1,8	5,8	12	21	32	10

Аналогично предыдущему сопротивление всех участков труб стояка *6* по кольцу прибора первого этажа будет следующим:

$$\Sigma (Rl + Z)_6 = (10 + 32 + 21 + 12 + 5{,}8 + 1{,}8 + 0{,}5) \times 2 \times 3{,}4 = 565 \text{ мм вод. ст.}$$

Полученный результат показывает, что в рассматриваемом стояке уже в кольце прибора первого этажа располагаемый напор полностью не может быть использован. В остатке имеется:

$$\Delta H_I = 695 - 565 = 130 \text{ мм вод. ст.}$$

Располагаемый напор прибора второго этажа может быть вычислен аналогично тому, как это было сделано в первом стояке, с добавлением непогашенного выше напора:

$$H_{II} = (0{,}5 + 1{,}8) \times 2 \times 3{,}4 + 3{,}4 \times 15{,}9 + 130 = 200 \text{ мм вод. ст.}$$

Соответственно сопротивление участков 2—2′—1′ при диаметре обратного стояка, равном $^1/_2''$, будет следующим:

$$\Sigma (Rl + Z)_{2\,эт} = (0{,}3 + 32) \times 2 \times 3{,}4 = 220 \text{ мм вод. ст.}$$

Полученный результат показывает, что при диаметре обратного стояка на этом участке в $^1/_2''$ сопротивления получаются бо́льшими (220 *мм вод. ст.*), чем располагаемый напор (200 *мм вод. ст.*), и, следовательно, диаметр обратного стояка на этом участке должен быть увеличен.

Таким образом, несмотря на то, что в первом расчетном кольце, по первому этажу, участок с расходом воды в 336 *л/час* мог быть принят в $^1/_2''$, во втором этаже, где располагаемый напор в общем больше, в обратном стояке при том же расходе воды приходится ставить трубу большего диаметра. Указанное обстоятельство происходит только потому, что соседний параллельный участок, с которым рассматриваемый участок должен быть уравновешен, имеет очень небольшое сопротивление.

Если принять диаметр труб на участке 2′—1′ в $^3/_4''$, то сопротивление обоих рассматриваемых участков будет следующее:

$$\Sigma (Rl + Z)_{2\,эт.} = (0{,}3 + 6{,}5) \times 2 \times 3{,}4 = 46 \text{ мм вод. ст.}$$

В избытке остается

$$\Delta H_{II} = 200 - 46 = 154 \text{ мм вод. ст.}$$

Для третьего этажа:

$$H_{III} = 200 + 5{,}8 \times 3{,}4 \times 2 + 54 = 293 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{3\,эт.} = (0{,}3 + 21 + 6{,}5) \times 2 \times 3{,}4 = 189 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{III} = 293 - 189 = 104 \text{ мм вод. ст.}$$

Для четвертого этажа:

$$H_{IV} = 293 + 12 \times 3{,}4 \times 2 + 54 = 429 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{4\,эт.} = 189 + 12 \times 3{,}4 \times 2 = 271 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{IV} = 429 - 271 = 158 \text{ мм вод. ст.}$$

Для пятого этажа:

$$H_{V} = 429 + 2 \times 21 \times 3{,}4 + 54 = 626 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{5\,эт.} = 271 + 5{,}8 \times 2 \times 3{,}4 = 310 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{V} = 626 - 310 = 316 \text{ мм вод. ст.}$$

Для шестого этажа:

$$H_{VI} = 626 + 2 \times 32 \times 3{,}4 + 54 = 898 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{6\,эт.} = 310 + 1{,}8 \times 2 \times 3{,}4 = 322 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{VI} = 898 - 322 = 576 \text{ мм вод. ст.}$$

Полученный результат показывает, что в шестом стояке остаточные напоры оказываются еще бо́льшими и, в частности, по прибору шестого этажа располагаемый напор использован только на 36%.

Степень использования располагаемых напоров в обоих стояках показана на графике (см. рис. 7).

При применении труб с внутренним диаметром в 12,5 *мм* сопротивление первого расчетного кольца было бы следующим:

$$\Sigma (Rl + Z)_1 = (2{,}7 + 6{,}5 + 4{,}2 + 2{,}5 + 5{,}8 + 5{,}6 + 1{,}4)\,6{,}8 = 195 \text{ мм вод. ст.}$$

Соответственно $H_{II} = (1{,}4 + 5{,}6) \times 6{,}8 + 3{,}4 \times 15{,}9 = 102$ *мм вод. ст.*

Весь дальнейший расчет был бы следующим:

$$\Sigma (Rl + Z)_{2\ эт.} = (0{,}9 + 6{,}5) \times 6{,}8 = 50 \text{ мм вод. ст}$$

$$\Delta H_{II} = 102 - 50 = 52 \text{ мм вод. ст.}$$

$$H_{III} = 141 + 54 = 195 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{3\ эт.} = (0{,}9 + 21 + 6{,}5) \times 6{,}8 = 193 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{III} = 195 - 193 = 2 \text{ мм вод. ст.}$$

$$H_{IV} = 212 + 54 = 266 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{4\ эт.} = (0{,}9 + 12 + 21 + 6{,}5) \times 6{,}8 = 274 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{IV} = 266 - 274 = -8 \text{ мм вод. ст.}$$

$$H_{V} = 295 + 54 = 349 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{5\ эт.} = (0{,}9 + 5{,}8 + 12 + 21 + 6{,}5) \times 6{,}8 = 314 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{V} = 349 - 314 = 35 \text{ мм вод. ст.}$$

$$H_{VI} = 393 + 54 = 447 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Sigma (Rl + Z)_{6\ эт.} = (1{,}4 + 5{,}6 + 5{,}8 + 12 + 21 + 6{,}5) \times 6{,}8 = 356 \text{ мм вод. ст.}$$

$$\Delta H_{VI} = 447 - 356 = 91 \text{ мм вод. ст.}$$

Полученные и принятые в результате данного варианта расчета диаметры труб показаны в скобках на той же схеме рис. 7. Как видно на схеме, замененными на более мелкие диаметры труб — $^1/_2''$ и $^3/_8''$ — оказались только два участка, из которых один участок сменен с $^3/_4''$ на $^1/_2''$ и второй с $^1/_2''$ на $^3/_8''$. Кроме того, конечно, заменены с $^1/_2''$ на $^3/_8''$ диаметры всех подводок труб к нагревательным приборам.

Рассмотрение результатов расчета показывает, что введение дополнительного диаметра (12,5 *мм*) значительно улучшило гидравлическую увязку отдельных колец. В результате относительно небольшие остаточные напоры остались по существу лишь в трех этажах. Суммарный размер остаточных напоров, по сравнению с первым расчетом, сократился в 3 раза, что имеет очень большое значение для регулировки системы.

Для того чтобы при эксплоатации отопительной системы расход воды распределялся по отдельным трубопроводам в соответствии с необходимым в каждом приборе расходом тепла, в этом приборе должно быть создано местное сопротивление, равное остаточному напору. Такое сопротивление обычно создается краном двойной регулировки, установленным у прибора. Практически, вследствие сложности ее, регулировка кранами в системах водяного отопления редко выполняется достаточно качественно. Сложность регулировки объясняется, во-первых, большим числом взаимно связанных нагревательных приборов и, во-вторых, отсутствием показателей, по которым можно было бы производить достаточно точно необходимую регулировку. Кроме того, даже хорошая первоначальная регулировка системы в дальнейшем может быть легко нарушена. Ввиду этого

необходимо выяснить, какой тепловой режим может установиться в системах отопления, если требуемая регулировка кранами фактически не будет осуществлена.

Влияние остаточных напоров на тепловой режим системы отопления может быть выявлено решением как уравнений теплопередачи нагревательных приборов и ограждающих конструкций, так и уравнений гидравлического сопротивления трубопроводов.

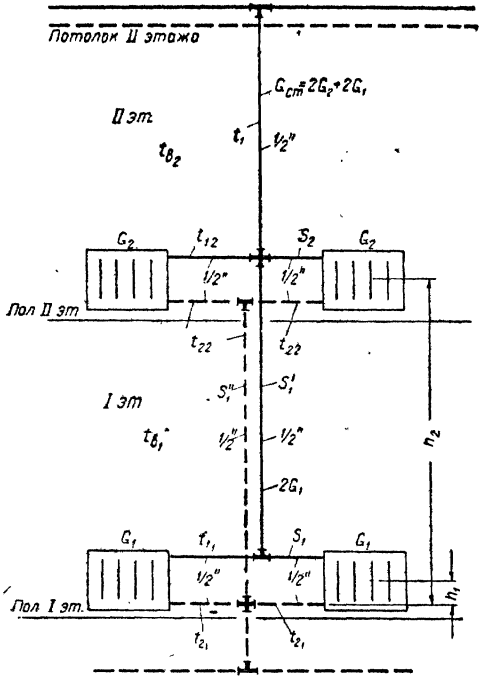


Рис. 8. Схема двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой

Анализ теплового режима двухтрубной системы отопления, даже в пределах одного стояка при многоэтажной системе, весьма сложен, так как распределение потоков воды по отдельным приборам стояка зависит не только от пропускной способности отдельного участка при заданном общем циркуляционном напоре системы, но и от гравитационных напоров, которые возникают в системе вследствие разности температур воды в подающих и обратных трубах.

Каждый участок стояка и каждый нагревательный прибор имеют свою температуру, влияющую на образование соответствующего гравитационного напора, который, в свою очередь, влияет на распределение потоков воды по стояку. Значительное количество неизвестных величин сильно осложняет решение задачи.

Анализ затронутого вопроса целесообразнее всего, поэтому, начать с рассмотрения простейшего случая системы в два этажа.

Тепловой и гидравлический режим двухэтажного стояка (рис. 8) может быть определен решением следующей системы уравнений:

$$G_0' = nG_0 = 2G_1' + 2G_2' \qquad (30)$$

$$\frac{t_{12}' + t_{22}' - 2t_{в2}'}{t_{12} + t_{22} - 2t_{в2}} = \frac{t_{в2}' - t_н'}{t_{в2} - t_н} = \frac{G_2'(t_{12}' - t_{22}')}{G_2(t_{12} - t_{22})} \qquad (31)$$

$$\frac{t'_{11}+t'_{21}-2t'_{в1}}{t_{11}+t_{21}-2t_{в1}}=\frac{t'_{в1}-t'_{н}}{t_{в1}-t_{н}}=\frac{G'_1\left(t'_{11}-t'_{21}\right)}{G_1\left(t_{11}-t_{21}\right)} \tag{32}$$

$$S_2G_2'^2+S''_1\left(2G'_2\right)^2-S_1G_1'^2-S'_1\left(2G'_1\right)^2=$$

$$=h_2\left(\gamma'_{22}-\gamma'_1\right)-h_1\left(\gamma'_{21}-\gamma'_1\right). \tag{33}$$

В приведенной системе уравнений приняты следующие обозначения:

G_0 — расчетный расход воды в стояке,, *кг/час*;

n — коэфициент изменения расчетного расхода воды;

G_1 и G_2 — расходы воды в приборах первого и второго этажей, *кг/час*;

t_{12} и t_{11} — температуры воды на входе в приборы второго и первого этажей;

t_{22} и t_{21} — температуры воды на выходе из приборов второго и первого этажей;

$t_{в2}$ и $t_{в1}$ — внутренняя температура второго и первого этажей;

$t_н$ — температура наружного воздуха;

S_2, S_1, S'_1 и S''_1 — характеристики гидравлического сопротивления участков труб схемы рис. 8 — гидравлическое сопротивление при единице расхода воды, *кг/час*;

h_2 и h_1 — высота расположения середины приборов второго и первого этажей от обратной подводки;

γ_{21} и γ_{22} — объемный вес воды в соответствующих участках труб схемы рис. 8, *кг/м*^{3}.

В указанных обозначениях все буквы без штриха соответствуют расчетному режиму, а со штрихами — искомому. В приведенной системе уравнений не учитывается изменение коэфициента теплопередачи нагревательных приборов, поскольку введение этого фактора осложняет расчеты, не давая существенных изменений в их результате.

Также не учитывается в большинстве последующих исследований охлаждение воды в трубах, в соответствии с чем принимается:

$$t_{12}=t_{11}=t_1$$

и

$$t'_{12}=t'_{11}=t'_1.$$

Во всех случаях принимается:

$$t_{в2} = t_{в1} = t_в = 18°$$

и

$$\gamma_t = 1019 - 0{,}6t.$$

Принятая зависимость при обычной высоте здания $h_2 = 3{,}65$ *м* и $h_1 = 0{,}25$ *м* дает возможность в уравнении (33) произвести следующие замены:

$$h_2\left(\gamma'_{22} - \gamma'_1\right) = 2{,}2\left(t'_1 - t'_{22}\right)$$

и

$$h_1\left(\gamma'_{21} - \gamma'_1\right) = 0{,}15\left(t'_1 - t'_{21}\right).$$

Уравнение (33) будет в этом случае иметь следующее значение:

$$\left(S_2 + 4S''_1\right)G'^2_2 - \left(S_1 + 4S'_1\right)G'^2_1 =$$

$$= 2{,}2\left(t'_1 - t'_{22}\right) - 0{,}15\left(t'_1 - t'_{21}\right). \qquad (33')$$

Если принять в уравнениях (31) и (32):

$$\left.\begin{aligned} t_{12} + t_{22} - 2t_{в2} &= t_{11} + t_{21} - 2t_{в1} = b,\\ t_{в2} - t_н &= t_{в1} - t_н = c,\\ t_{12} - t_{22} &= t_{11} - t_{21} = d, \end{aligned}\right\} \qquad (34)$$

то в этом случае они могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{t'_1 + t'_{22} - 2t'_{в2}}{b} = \frac{t'_{в2} - t'_н}{c} = \frac{G'_2\left(t'_1 - t'_{22}\right)}{d \cdot G_2}$$

$$\frac{t'_1 + t'_{21} - 2t'_{в1}}{b} = \frac{t'_{в1} - t'_н}{c} = \frac{G'_1\left(t'_1 - t'_{21}\right)}{d \cdot G_1}.$$

Если принять диаметры труб в схеме рис. 8 (применительно к которой проводится настоящий анализ) одинаковыми, то будет иметь место следующее равенство:

$$4S''_1 + S_2 = 4S'_1 + S_1 = A.$$

Принятое равенство дает возможность преобразовать уравнение (33') следующим образом:

$$A\left(G'^2_2 - G'^2_1\right) = 2{,}2\left(t'_1 - t'_{22}\right) - 0{,}15\left(t'_1 - t'_{21}\right).$$

Если в полученном уравнении на основании равенства (30) исключить один из неизвестных расходов воды, то получается:

$$0{,}25An^2G_0^2 - AnG_0G_1' = 2{,}2\left(t_1' - t_{22}'\right) - 0{,}15\left(t_1' - t_{21}'\right).$$

После элементарного преобразования получается:

$$AnG_0G_1' = 2{,}2t_{22}' - 0{,}15t_{21}' - 2{,}05t_1' + 0{,}25An^2G_0^2. \qquad (35)$$

В выведенном уравнении неизвестными будут G_1', t_{22}' и t_{21}'.

Для решения уравнения (35) необходимо вывести значения t_{22}' и t_{21}' в зависимости от расхода воды G_1', что можно сделать при помощи уравнений (31) и (32).

Решение уравнений (31) и (32) относительно внутренних температур помещений определяет эти последние следующим образом:

$$t_{в2}' = \frac{ct_1' + ct_{22}' + bt_н'}{b + 2c} \text{ и } t_{в1}' = \frac{ct_1' + ct_{21}' + bt_н'}{b + 2c}. \qquad (36)$$

После подстановки найденных значений внутренних температур из уравнений (31) и (32) можно получить, что:

$$t_{22}' = \frac{t_1'G_2' + e}{G_2' + f} = \frac{t_1'\left(0{,}5nG_0 - G_1'\right) + e}{0{,}5nG_0 - G_1' + f}, \qquad (37)$$

$$t_{21}' = \frac{t_1'G_1' + e}{G_1' + f},$$

где:

$$e = \frac{d\left(2t_н' - t_1'\right)}{b + 2c} \cdot G_2;$$

$$f = \frac{[d}{b + 2c} \cdot G_2.$$

Если подставить теперь найденные значения обратных температур в уравнение (35), то последнее будет иметь следующее выражение:

$$AnG_0G_1' = 2{,}2\frac{t_1'\left(0{,}5nG_0 - G_1'\right) + e}{0{,}5nG_0 - G_1' + f} - 0{,}15\frac{t_1'G_1' + e}{G_1' + f} - 2{,}05t_1' + \\ + 0{,}25An^2G_0^2.$$

В итоге, таким образом, получилось одно уравнение с одним неизвестным.

В окончательном виде это уравнение будет:

$$AnG_1'^3 - 0{,}75An^2G_0G_1'^2 + \left[\left(0{,}125n^2G_0^2 - 0{,}5nfG_0 - f^2\right)An - \right.$$
$$\left. - 2{,}35\left(t_1'f - e\right)\cdot G_0^{-1}\right]G_1' + \left(0{,}125nG_0 + 0{,}25f\right)Afn^2G_0 +$$
$$+ \left(0{,}075n - 2{,}05fG_0^{-1}\right)\left(ft_1' - e\right) = 0. \qquad (35')$$

Полученное уравнение (35′) дает возможность найти распределение потоков воды и соответственно определить тепловой режим в любой двухэтажной двухтрубной системе с верхней разводкой для различных нагрузок стояков, а также при любых температурах наружного воздуха и теплоносителя.

Для решения приведенного уравнения необходимо предварительно найти значения характеристик гидравлического сопротивления участков труб схемы рис. 8.

Падение напора в трубопроводах можно с достаточной для настоящего исследования точностью принять равным:

$$R = 500\cdot G^2\cdot d^{-5{,}25}\cdot l_{пр}\ мм\ вод.\ ст.; \qquad (38)$$

здесь: G — расход воды, *кг/час*;
d — диаметр трубы, *мм*;
$l_{пр}$ — приведенная (с учетом местных сопротивлений) длина участка трубы, *м*.

В соответствии с уравнением (38) характеристика гидравлического сопротивления участка трубопровода будет иметь следующее значение:

$$S = 500\ d^{-5{,}25}\cdot l_{пр}\ мм\ вод.\ ст/кг^2. \qquad (39)$$

В соответствии с обозначениями и размерами схемы рис. 8, принимая при этом, что на местные сопротивления затрачивается 50% располагаемого напора, характеристики гидравлических сопротивлений будут иметь следующие значения:

$$S_1 = S_2 = 500 \times 15{,}75^{-5{,}25} \times 2{,}5 \times 2 = 1{,}30 \times 10^{-3};$$

$$S_1' = S_1'' = 500 \times 15{,}75^{-5{,}25} \times 3{,}4 \times 2 = 1{,}76 \times 10^{-3}.$$

Тогда в уравнении (35′)

$$A = S_1 + 4S_1' = S_2 + 4S_1'' = 8{,}34 \times 10^{-3}$$

и оно будет иметь следующий вид:

$$8{,}34 \times 10^{-3} n G_1'^3 - 7{,}86 \times 10^{-3} n^2 G_0 G_1'^2 +$$

$$+ \left[\left(0{,}125 n^2 G_0^2 - 0{,}5 n f G_0 + f^2\right) 8{,}34 \times 10^{-3} \times n - \right.$$

$$\left. - \left(t_1' f - e\right) 2{,}35 G_0^{-1}\right] G_1' + \left(0{,}125 n G_0 + 0{,}25 f\right) 8{,}34 \times$$

$$\times 10^{-3} f n^2 G_0 + \left(0{,}075 n - 2{,}05 G_0^{-1}\right)(f - e) = 0. \qquad (35'')$$

Пусть требуется определить распределение потоков воды и тепловой режим помещений, отапливаемых стояком схемы рис. 8, при расходе воды в стояке $G_0 = 160$ *кг/час*. Соответственно $G_2 = G_1 = 40$ *кг/час*. Расчетный суммарный расход воды в стояке выдерживается постоянным, следовательно $n = 1$; расчетные температуры следующие:

$$t_1 = t_1' = 95°,\ t_{21} = t_{22} = 70°,\ t_в = 18°\ \text{и}\ t_н = t_н' = -30°.$$

Принятые значения расчетных температур дают возможность определить в уравнениях (34—37):

$$b = 129,\ c = 48,\ d = 25,\ e \approx -689,\ f \approx 4{,}44.$$

После соответствующих преобразований и вычислений уравнение (35″) будет иметь в окончательном виде следующее значение:

$$8{,}34 \times 10^{-3}\ G_1'^3 - G_1'^2 + 7{,}24 G_1' + 145{,}1 = 0.$$

Полученное уравнение может быть, очевидно, решено только способом постепенного приближения.

Способов приближенного решения уравнений выше второй степени, как известно, имеется несколько. Полученное уравнение решается одним из наиболее простых способов (способом Ньютона).

Для отыскания корней рассматриваемого уравнения, достаточно близких к истинным, необходимо сначала определить два любых корня, между которыми лежит его истинное значение.

Пусть эти корни будут 10 и 20.

Дествительно, при данных значениях неизвестного:

$$f(G) = f(10) = 125{,}8$$

и

$$f(G) = f(20) = -43{,}4.$$

Полученный результат доказывает, что истинное значение корня лежит между найденными значениями; применяя уравнение Лагранжа и пользуясь ближайшим корнем, можно записать, что:

$$G_1 = G + \left[\frac{-f(G)}{f'(G)}\right].$$

Первая производная рассматриваемого уравнения будет иметь следующее значение:

$$f'(G) = 0{,}025G^2 - 2G + 7{,}24,$$

откуда

$$f'(G) = f'(20) = 10 - 40 + 7{,}24 \approx -22{,}8.$$

Тогда:

$$G_1 = 20 + \frac{43{,}4}{-22{,}8} = 18{,}1.$$

Если подставить найденный корень в выведенное выше основное уравнение, результат будет следующим:

$$f(G_1) = f(18{,}1) = -1{,}7.$$

Найденный корень настолько близок к действительному, что в дальнейшем уточнении не нуждается, а потому можно принять, что

$$G_1' = 18 \text{ } кг/час \text{ и } G_2' = 2 \times 40 - 18 = 62 \text{ } кг/час.$$

По найденному расходу воды нетрудно определить и все остальные неизвестные.

Действительно, из уравнений (36 и 37)

$$t_{22}' = \frac{95 \times (80-18) - 689}{80 - 18 + 4{,}44} = 78{,}6°,$$

$$t_{21}' = \frac{95 \times 18 - 689}{18 + 4{,}44} = 45{,}5°,$$

$$t_{в2}' = \frac{48 \times (95 + 78{,}6) - 129 \times 30}{129 + 96} = 19{,}8°,$$

$$t_{в1}' = \frac{48 \times (95 + 45{,}5) - 129 \times 30}{129 + 96} = 12{,}8°.$$

Полученный результат показывает, что если во втором этаже остаточный напор не будет погашен прикрытием крана, то расход воды в приборе верхнего этажа при неизменном общем расходе воды в стояке, равном 160 *кг/час*, может превосходить расход воды в приборе первого этажа в 3—4 раза.

Такое резкое перераспределение расходов воды между этажами привело, естественно, к резкому изменению и внутренних температур: в верхнем этаже она поднялась с 18° до 19,8°, а в нижнем опустилась до 12,8°.

Следовательно, раскрытие регулировочных кранов верхних этажей, способствуя относительно малому повышению температур в верхних этажах, наносит вред нижним этажам в неизмеримо большей степени.

Таким же образом нетрудно определить распределение расходов воды и температур по этажам и при других расходах тепла нагревательными приборами — 750, 1250 и 1500 *ккал/час*. Результаты расчетов приведены в табл. 5 и на рис. 9.

Таблица 5

Разрегулировка 2-трубной системы с верхней разводкой в зависимости от изменения в ней расхода воды

Расчетная теплоотдача одного прибора, *ккал/час*	Расход воды по этажам		Температура обратной воды		Внутренняя температура	
	кг/час / % к норме	*кг/час* / % к норме	t_{22}	t_{21}	$t_{в2}$	$t_{в1}$
750	52 / 173	8 / 27	78,8	20,5	22,0	7,9
1000	62 / 155	18 / 45	78,6	45,5	19,8	12,8
1250	70 / 140	30 / 60	75,9	54,9	18.7	15,2
1500	79 / 132	41 / 68	74,7	59,1	18,6	15,9

Примечание. Числитель в *кг/час*, знаменатель в %.

Табл. 5 показывает, насколько велико может быть расхождение в температурах и расходах воды между первым и вторым этажами даже у небольшой двухэтажной системы, если остаточные напоры по тем или иным причинам окажутся непоглощенными.

Необходимо подчеркнуть, что принятые в таблице нагрузки достаточно велики; на практике наиболее распространена установка нагревательных приборов с нагрузкой до 1000 *кал*.

Приведенные таблица и график показывают также, что размеры разрегулировки системы тем больше, чем меньше за-

гружен стояк. Следовательно, при вынужденной ограниченности применения труб по диаметру выгоднее нагружать стояк возможно больше. При малых нагрузках на приборы целесообразно прибегать к последовательному соединению приборов и не оставлять располагаемые напоры не погашенными.

Полученное расхождение внутренних температур в верхних и нижних этажах находится в прямой зависимости от воз-

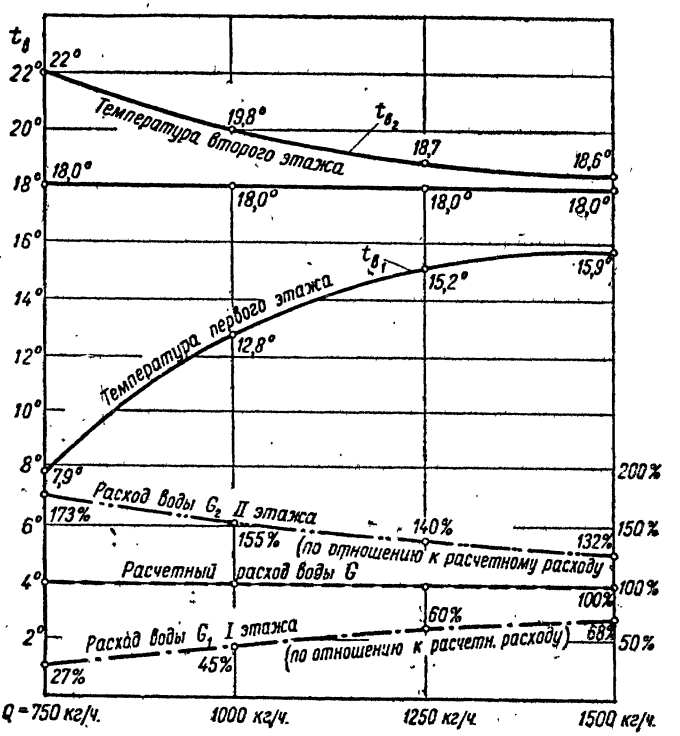


Рис. 9. Разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой в зависимости от изменения нагрузки стояка

никающего в водяных системах гравитационного напора и от соотношения этого напора и гидравлического сопротивления подающих участков трубопроводов первого этажа, в которых дополнительный гравитационный напор очень мал.

На рис. 10 для каждого разобранного выше случая показаны удельные падения напоров и отношение возникающего во втором этаже дополнительного гравитационного напора к сопротивлению параллельно включенного участка трубопровода первого этажа по расчету и фактически. Из рис. 10 видно, что при относительно малых нагрузках стояка (750 *ккал/час* на прибор) расчетное отношение напоров достигает 17,0, а фак-

тическое — 40; следовательно, гравитационный напор второго этажа при указанной нагрузке во много раз превосходит сопротивление участков труб первого этажа и только при нагрузке в 1500 *ккал/час* на каждый прибор это отношение снижается до 5,0 и 3,7.

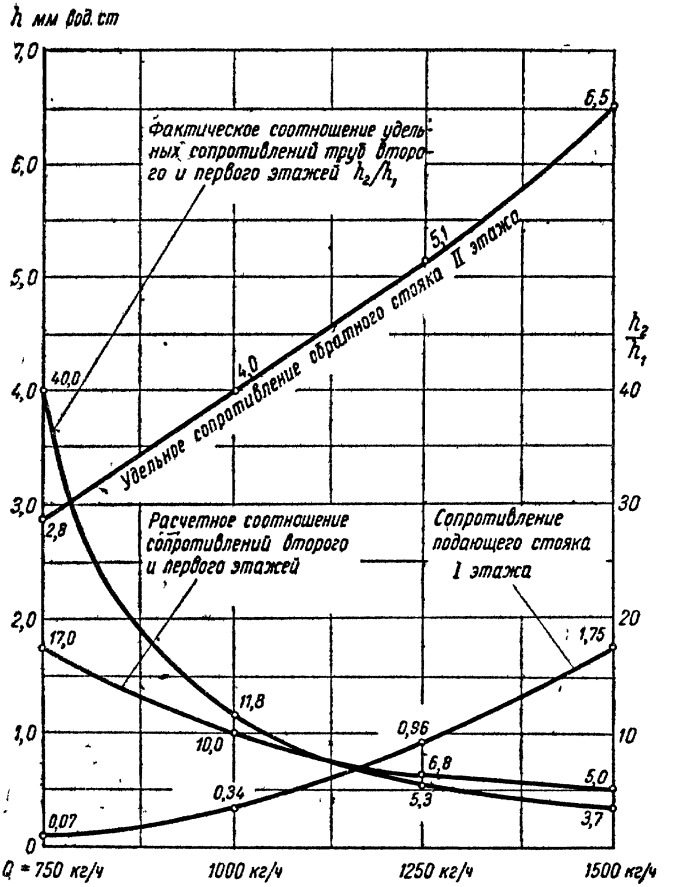


Рис. 10. Сопротивления трубопроводов двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой

Необходимо заметить, что указанные расхождения температур и расходов воды получены для температуры наружного воздуха — 30°, когда гравитационный напор достигает максимального значения; при более высоких температурах наружного воздуха это расхождение, естественно, будет уменьшаться.

Размер разрегулировки, который будет иметь место при таких температурах в приведенной на рис. 8 системе, можно определить решением выведенного ранее уравнения (35″).

Если принять $t'_н = +10°$ и соответственно по уравнению (5′) $t'_1 = 30{,}8°$, то уравнение (35″), в котором значения всех постоянных остаются без изменений, за исключением

$$e = \frac{d\left(2t'_н - t'_1\right)\cdot G'_2}{b+2c} = \frac{-25\times 10{,}8\times 40}{225} = -48{,}0,$$

при $n = 1{,}0$ будет иметь следующее значение:

$$8{,}34\times 10^{-3}G'^{3}_1 - G'^{2}_1 + 20{,}8G'^{2}_1 + 129{,}6 = 0.$$

Решение полученного уравнения определяет расходы воды в первом и втором этажах следующим образом:

$$G'_1 = 34{,}5 \text{ и } G'_2 = 45{,}5 \text{ кг/час},$$

откуда

$$t'_{22} = \frac{30{,}8\times 45{,}5 - 48}{45{,}5 + 4{,}44} = 27{,}8°,$$

$$t'_{21} = \frac{30{,}8\times 34{,}5 - 48}{34{,}5 + 4{,}44} = 26{,}7°$$

и, соответственно:

$$t'_{в2} = \frac{48\,(30{,}8 + 27{,}8) + 129\times 10}{225} = 18{,}1°,$$

$$t'_{в1} = \frac{48\times (30{,}8 + 26{,}7) + 129\times 10}{225} = 17{,}8°.$$

Полученный результат показывает, что если при температуре наружного воздуха—30° в рассматриваемой системе имело место расхождение в расходах воды верхнего и нижнего этажей более чем в три раза (18 и 62 *кг*), то при температуре наружного воздуха +10° в той же системе расхождение в расходах воды сокращается до 30% (34,5 и 45,5) — таково влияние гравитационного напора.

Расхождение в температурах помещений верхнего и нижнего этажей получается еще меньшим — найденные температуры почти равны: $t'_{в1} = 17{,}8°$ и $t'_{в2} = 18{,}1°$.

Полученный результат объясняет, почему иногда встречающееся на практике сравнительно небольшое расхождение температур верхних и нижних этажей в начале отопительного сезона с понижением наружной температуры значительно увеличивается.

Распределение расходов воды и температур по этажам для различных температур наружного воздуха приведено на рис. 11.

По приведенным выше результатам исследования системы водяного отопления в два этажа можно судить о том, что про-

исходит и в других двухтрубных системах. Вместе с тем следует определить истинные размеры возможной вертикальной разрегулировки в стояке многоэтажной системы.

В качестве примера можно принять первый стояк фиг. 7, при расчете которого почти во всех этажах часть располагае-

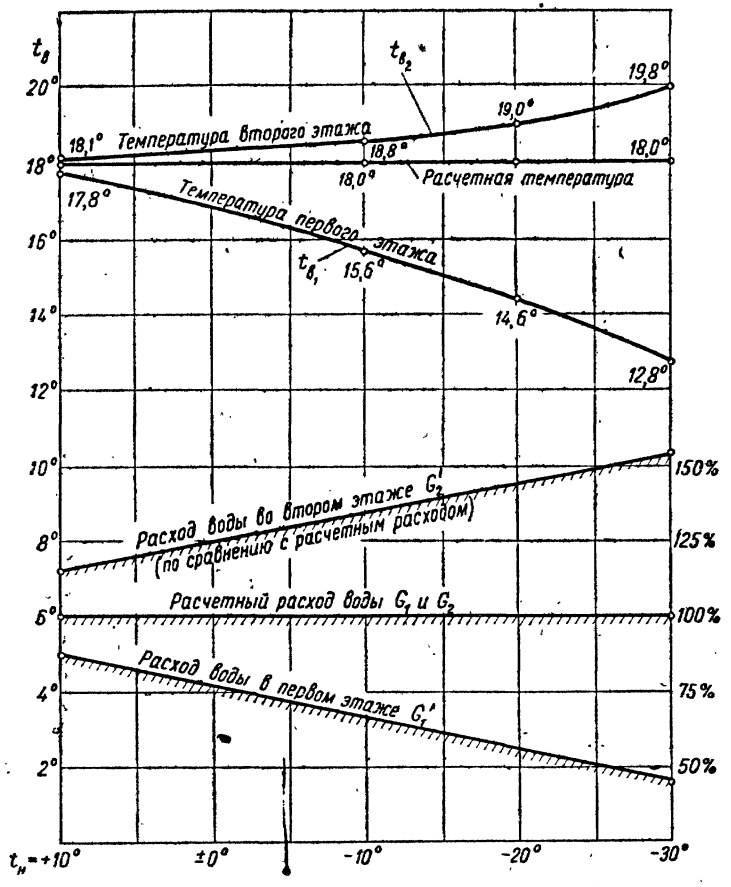


Рис. 11. Разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой в зависимости от наружной температуры

мого напора осталась непогашенной (из-за ограниченности применяемого сортамента труб).

Для того чтобы выявить тепловой режим, устанавливающийся в многоэтажной системе водяного отопления, необходимо определить, как заданный расход воды по стояку в целом распределится по отдельным этажам и приборам.

Перераспределение расходов воды в стояке многоэтажной системы при наличии в ней остаточных напоров и раскрытых

регулировочных кранах у приборов может быть найдено в результате решения системы уравнений, выражающих равенство разностей сопротивлений параллельно включенных участков трубопроводов по этажам и действующих в них дополнительных гравитационных напоров.

Для шестиэтажного стояка необходимо принять для решения следующую систему уравнений:

$$S_6G_6^2+S_5''(2G_6)^2-S_5'(G_0-2G_6)^2-S_5G_5^2=\Delta H_6,$$

$$S_5G_5^2+4S_4''(G_6+G_5)^2-S_4'(G_0-2G_6-2G_5)^2-S_4G_4^2=\Delta H_5,$$

$$S_4G_4^2+4S_3''(G_6+G_5+G_4)^2-S_3'(G_0-2G_6-2G_5-2G_4)^2-$$
$$-S_3G_3^2=\Delta H_4,$$

$$S_3G_3^2+4S_2''(G_6+G_5+G_4+G_3)^2-S_2'(G_0-2G_6-2G_5-2G_4-$$
$$-2G_3)^2-S_2G_2^2=\Delta H_3,$$

$$S_2G_2^2+4S_1''(G_6+G_5+G_4+G_3+G_2)^2-S_1'(2G_1)^2-S_1G_1^2=\Delta H_2,$$

$$0{,}5G_0=G_6+G_5+G_4+G_3+G_2+G_1. \qquad (40)$$

Если принять, что дополнительный гравитационный напор при расчетном расходе воды в заданных строительных размерах здания может быть определен достаточно точно разностью температур по формуле:

$$\Delta H_{расч}=0{,}6\Delta t\cdot h=0{,}6\times 25\times 3{,}4\approx 50 \text{ мм вод. ст.},$$

то, соответственно, истинная величина дополнительного напора также достаточно точно может быть определена из равенства

$$\Delta H=\frac{50\cdot G_{расч}}{G_{факт}},$$

в котором: $G_{расч}$ — расчетный расход воды в рассматриваемом участке трубопровода;

$G_{факт}$ — фактический расход воды, устанавливающийся на участке вследствие разрегулировки системы.

Величины характеристик гидравлических сопротивлений, определенные по уравнению (39), будут здесь следующими:

$$S_1=S_2=S_3=S_4=S_5=S_6=1{,}30\times 10^{-3},$$
$$S_1'=S_2'=S_5''=S_4''=S_3''=1{,}76\times 10^{-3},$$
$$S_3'=S_4'=S_5'=S_2''=S_1''=0{,}37\times 10^{-3}.$$

Если найденные значения характеристик гидравлического сопротивления отдельных участков труб подставить в систему уравнений (40), то решение этой системы дает следующее распределение расходов воды по этажам в абсолютных цифрах и в процентах к расчетным расходам воды:

$$G_6 = 78,\ G_5 = 14,\ G_4 = 10,\ G_3 = 69,\ G_2 = 13,\ G_1 = 24\ кг/час$$

195% 44% 31% 216% 41% 60%

Полученные результаты оказались довольно неожиданными. В самом деле, и по величине остаточных напоров в схеме (см. рис. 7), и по расположению приборов по этажам можно было ожидать, что перерасход воды будет иметь место во всех приборах верхних этажей, и тем больше, чем выше расположен прибор, и, наоборот, заниженные расходы воды будут в приборах нижних этажей опять же тем больше, чем ниже расположен прибор. В действительности перераспределение расходов воды произошло иначе. Завышенные расходы воды против расчетных имеют лишь два этажа — шестой и третий. Все остальные приборы, несмотря на наличие у них остаточных напоров и полное раскрытие регулировочных кранов, положенного им по расчету расхода воды не получают.

Расход воды в приборах пятого этажа оказался почти равен расходу ее во втором этаже, а расход воды в приборах первого этажа почти на 50% превысил расход ее в приборах второго этажа.

Такой результат объясняется наличием большого избыточного напора в приборах шестого этажа, который, соответственно, весьма значительно (на 95%) увеличил в них расход воды, создав тем самым повышенные сопротивления в обратных трубах. Наличие повышенных сопротивлений в обратных трубах за приборами шестого этажа привело к значительному сокращению расходов воды в приборах пятого и четвертого этажей.

В третьем этаже расход воды снова оказался намного выше расчетного (216%); это объясняется тем, что ниже третьего этажа трубы обратного стояка имеют переход с $\frac{1}{2}''$ на $\frac{3}{4}''$, что и привело к увеличению расхода воды в приборах третьего этажа.

Полученный результат показывает, таким образом, что перераспределение расходов воды и размер разрегулировки стояка зависит не только от величины имеющихся остаточных напоров, но в значительно большей степени от установленных диаметров труб.

По найденным расходам воды нетрудно определить и внутренние температуры по этажам решением системы уравнений (26).

Указанная система уравнений может быть, естественно, применена к любому этажу, однако необходимо при этом учитывать, что вода в подающих трубах с переходом с этажа в этаж будет, вследствие своего охлаждения, терять температуру.

Охлаждение воды в трубах может быть учтено по формуле:

$$\Delta t = k_m \cdot f_m (t_1 - t_в) \cdot G^{-1}.$$

Для схемы (рис. 7) понижение температуры воды по этажам будет следующим:

$$\Delta t_5 = 12{,}5 \times 0{,}084 \times 3{,}4 \times (94 - 18) \times 336^{-1} = 0{,}8°,$$

$$\Delta t_4 = 12{,}5 \times 0{,}084 \times 3{,}4 \times (93{,}2 - 18) \times 272^{-1} = 1{,}0°,$$

$$\Delta t_3 = 12{,}5 \times 0{,}084 \times 3{,}4 \times (92{,}2 - 18) \times 208^{-1} = 1{,}3°,$$

$$\Delta t_2 = 12{,}5 \times 0{,}067 \times 3{,}4 \times (90{,}9 - 18) \times 144^{-1} = 1{,}5°,$$

$$\Delta t_1 = 12{,}5 \times 0{,}067 \times 3{,}4\,(89{,}4 - 18) \times 80^{-1} = 2{,}5°,$$

$$\Sigma \Delta t = 1{,}0 + 0{,}8 + 1{,}0 + 1{,}3 + 1{,}5 + 2{,}5 = 8{,}1°.$$

Полученный результат показывает, что, несмотря на относительно значительную нагрузку стояка, падение температуры теплоносителя по этажам получается весьма большим. Как видно из расчета, фактически вода в приборы первого этажа поступает с температурой 86,9° вместо расчетных 95°. Необходимо отметить, что падение температуры теплоносителя и во всех других стояках (более ближних) будет близко к найденным выше, поскольку падение температуры в магистралях относительно невелико, а диаметры труб во всех стояках почти одинаковы.

При изменении расхода воды в стояке можно с достаточной для данных расчетов точностью принять изменение падения температуры теплоносителя по закону:

$$\Delta t' = \Delta t \frac{G}{G'},$$

где: G — расчетный расход воды, *кг/час*;
G' — измененный расход воды, *кг/час*.

Найденные выше падения температур теплоносителя дают возможность решить приведенную выше систему уравнений (26), из которой можно определить значение внутренней температуры $t_в'$:

$$t_в' = (t_в - t_н) \frac{G'(t_1' - t_2')}{G(t_1 - t_2)} + t_н.$$

Найденное значение внутренней температуры дает возможность определить температуру воды в обратных трубах нагревательных приборов:

$$t'_2 = \frac{2G'(t_в - t_н)t'_1 - G(t_1 - t_2)t'_1 + G'(t_1 + t_2 - 2t_в)t'_1 + 2G(t_1 - t_2)t_н}{G(t_1 - t_2) + G'(t_1 + t_2 - 2t_в) + 2G'(t_в - t_н)}.$$

Общими для всех этажей в найденном выражении будут следующие величины: $t_1 - t_2 = 25°$; $t_в - t_н = 48°$ и $t_н = -30°$, которые дают возможность определить температуру обратной воды

$$t'_2 = \frac{[G'(t_1 + t_2 + 60) - 25G]t'_1 - 1500G}{25G + (t_1 + t_2 + 60)G'}.$$

Для шестого этажа температура обратной воды и, соответственно, температура помещения будут следующими:

$$t'_{26} = \frac{[78 \times (94 + 69 + 60) - 25 \times 40] \times 94 - 1500 \times 40}{25 \times 40 + (94 + 69 + 60) \times 78} = 80{,}7,$$

$$t'_{в6} = \frac{48 \times 78 \times (94 - 80{,}7)}{40 \times 25} - 30 = 19{,}8°.$$

Подобным же методом можно найти обратные температуры и температуры помещений и для всех других этажей.

Все полученные в результате произведенных расчетов данные приведены в табл. 6 и на рис. 12.

Таблица 6

Показатели разрегулировки стояка I (рис. 7)

Показатели	Место расположения прибора по этажам					
	VI	V	IV	III	II	I
Теплоотдача прибора по расчету, *ккал/час*	1000	800	800	800	800	1000
Расход воды по расчету, *кг/час*	40	32	32	32	32	40
Фактический расход воды, *кг/час*	78	14	10	69	13	24
Расход воды в процентах к расчетному	195	44	31	216	41	60
Температуры воды при входе в прибор по расчету, град.	94,0	93,2	92,2	90,9	89,4	86,9
Фактическая температура воды на входе в прибор, град.	94,0	93,0	91,8	90,5	86,8	82,6
Температура обратной воды, град.	80,7	42,5	26,8	78,3	34,6	43,5
Температура помещения, град.	19,8	12,5	9,0	20,5	10,7	15,0

Приведенные в табл. 6 данные показывают, что в связи с происшедшим в стояке перераспределением расходов воды начальная температура теплоносителя приборов первого этажа снизилась дополнительно на 4,3°, а всего на 12,4°, что соответственно отразилось и на понижении нагрева этого этажа. Чрезвычайно пестрой получилась далее по этажам картина температур в обратных трубах с пределами колебаний от 80,7° до 26,8°. Наиболее интересными являются внутренние температуры помещений, также с весьма большим диапазоном колебаний — от 20,5° во втором этаже до 9,0° в четвертом. Знаменательным также является то, что наиболее высокая температура оказалась не на шестом этаже, а на третьем, и наиболее низкая не на первом, а на четвертом этаже; как указывалось, это объясняется установленными в схеме диаметрами труб.

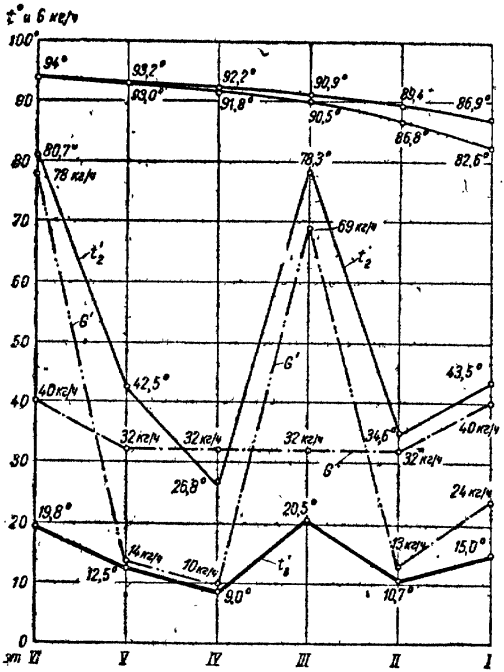


Рис. 12. Тепловой и гидравлический режим в стояке шестиэтажной системы с верхней разводкой

Колебания расходов воды и температур теплоносителя значительно более резки, чем колебания внутренних температур помещений. Температурные перепады теплоносителя, увеличивающиеся при малых расходах воды и уменьшающиеся при больших, выравнивают внутренние температуры помещений.

Следует еще раз отметить, что приведенные тепловой и гидравлический режимы системы определены исходя из предположения, что все краны системы отопления открыты на полный проток и что установившийся температурный режим относится к расчетной температуре наружного воздуха — 30°.

Таким же способом могут быть определены тепловой и гидравлический режимы любого стояка в любой системе.

Полученные результаты показывают, каких больших размеров может в некоторых случаях достигнуть разрегулировка системы, когда в ней при гидравлическом расчете остаются

остаточные напоры, не погашенные в дальнейшем регулировочными кранами.

Приведенный пример показывает также, что распределение температур по этажам может быть самым разнообразным, в соответствии с чем далеко не всегда может получиться лучшая прогреваемость верхних этажей и худшая — нижних.

3. Остаточные напоры при нижней разводке

Анализ влияния остаточных напоров на разрегулировку систем с низовой разводкой целесообразно начать, как и в предыдущем случае, с рассмотрения простейшего стояка в два этажа (рис. 13). Если не учитывать, как и в схеме с верхней разводкой, охлаждения воды в трубах и изменений коэфициентов теплопередачи нагревательных приборов (что можно сделать здесь с еще большим основанием, чем в системе с верхней разводкой), то тепловой и гидравлический режимы такого стояка будут определяться следующей системой уравнений:

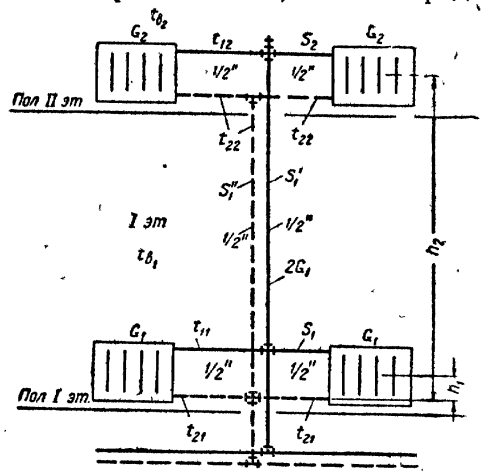


Рис. 13. Схема двухтрубной двухэтажной системы с нижней разводкой

$$G_0' = n\,G_0 = 2\,G_1' + 2\,G_2' = 2\,G_1 + 2\,G_2, \tag{41}$$

$$\frac{t_1' + t_{22}' - 2\,t_{в2}'}{t_1 + t_{22} - 2\,t_{в2}} = \frac{t_{в2}' - t_н'}{t_{в2} - t_н} = \frac{G_2'\left(t_1' - t_{22}'\right)}{G_2\left(t_1 - t_{22}\right)}, \tag{42}$$

$$\frac{t_1' + t_{21}' - 2\,t_{в1}'}{t_1 + t_{21} - 2\,t_{в1}} = \frac{t_{в1}' - t_н'}{t_{в1} - t_н} = \frac{G_1'\left(t_1' - t_{21}'\right)}{G_1\left(t_1 - t_{21}\right)}, \tag{43}$$

$$S_1'\left(2\,G_2'\right)^2 + S_2 G_2'^2 + S_1''\left(2\,G_2'\right)^2 - S_1 G_1'^2 = \\ = h_2\left(\gamma_{22} - \gamma_1\right) - h_1\left(\gamma_{21} - \gamma_1\right). \tag{44}$$

Все буквенные обозначения, диаметры труб и размеры на рис. 13 те же, что и на рис. 8, в соответствии с чем урав-

нение (44), по замене в нем характеристик гидравлического сопротивления их значениями, может быть приведено к виду:

$$15{,}38 \times 10^{-3} G_2'^2 - 1{,}3 \times 10^{-3} G_1'^2 = 2{,}2\left(t_1' - t_{22}'\right) - 0{,}15\left(t_1' - t_{21}'\right);$$

принимая $t_н' = t_н = -30°$, $t_1' = t_1 = 95°$; $t_{21} = t_{22} = 70°$; $t_{в1} = t_{в2} = 18°$; $n = 1{,}0$; $G_1 = G_2 = 30$ *кг/час*; $G_0 = 120$ *кг/час*; $b = 129$; $c = 48$; $d = 25$; $e = -516$ и $f = 3{,}34$ и заменяя значения t_{21}' и t_{22}' из уравнения (37), после преобразований можем получить в окончательном виде:

$$14{,}08 \times 10^{-3} G_1'^4 - 2{,}69\, G_1'^3 + 162{,}5\, G_1'^2 - 983\, G_1' - 13\,510 = 0.$$

Решая уравнение по способу Ньютона, получим: $G_1' = 15$ *кг/час* и $G_2' = 45$ *кг/час*.

По найденным расходам воды на основании уравнения (37) определены значения температур воды за приборами первого и второго этажей:

$$t_{21}' = \frac{95 \times 15 - 516}{15 + 3{,}34} = 49{,}8°,$$

$$t_{22}' = \frac{95 \times 45 - 516}{45 + 3{,}34} = 78{,}0°.$$

На основании уравнения (36) внутренние температуры будут следующими:

$$t_{в1}' = \frac{48 \times 95 + 48 \times 49{,}8 - 129 \times 30}{129 + 2 \times 48} = 13{,}7°,$$

$$t_{в2}' = \frac{48 \times 95 + 48 \times 78 - 129 \times 30}{129 + 2 \times 48} = 19{,}7°.$$

Подобным же образом нетрудно найти распределение расходов воды и температур между первым и вторым этажами и при других величинах теплоотдачи нагревательных приборов. Результаты произведенных расчетов приведены в табл. 7 и на рис. 14.

Сравнение данных табл. 7 и табл. 2 показывает, что разрегулировка системы с нижней разводкой магистральных труб оказывается меньшей по сравнению с системой с верхней разводкой. Последнее объясняется тем, что в системе с верхней разводкой длины участков труб первого и второго этажей примерно одинаковы, а в системе с нижней разводкой прибор первого этажа имеет более короткое соединение с магистральными трубами по сравнению с прибором второго этажа.

Таблица 7

Разрегулировка двухтрубной системы с нижней разводкой в зависимости от изменения в ней расхода воды

Расчетная теплоотдача прибора, *ккал/час*	Расход воды по этажам		Температура воды		Внутренняя температура помещения	
	G_2'	G_1'	t_{22}'	t_{21}'	$t_{в2}'$	$t_{в1}'$
750	45	15	78,0	49,8	19,7	13,7
1000	51	29	75,2	41,8	19,1	16,2
1250	56	44	72,4	67,0	18,5	17,3
1500	61	59	70,5	69,5	18,1	17,9

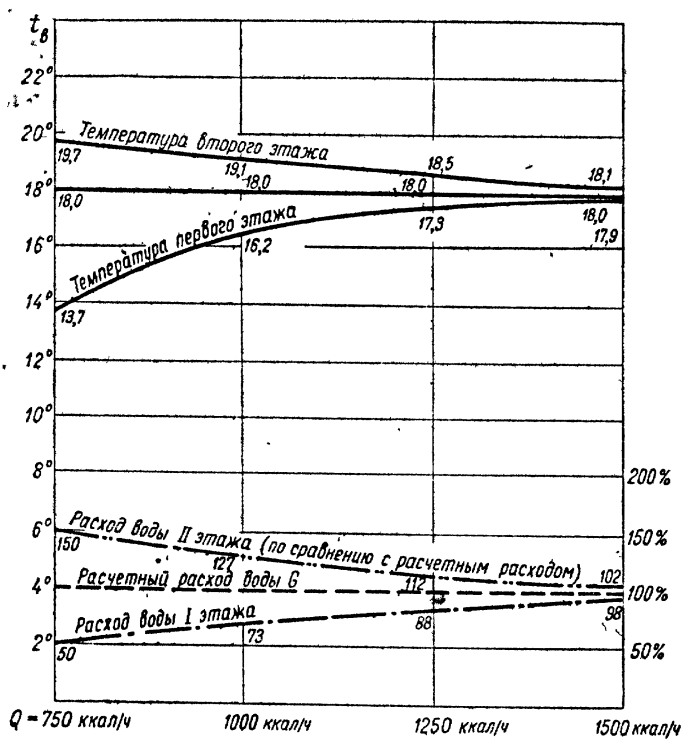


Рис. 14. Разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с нижней разводкой в зависимости от изменения нагрузки стояка

В системе с нижней разводкой наблюдаются, следовательно, два противоположных фактора — повышенный гравитационный напор второго этажа, который способствует увеличению рас-

хода воды во втором этаже, и более короткое соединение прибора первого этажа, которое способствует увеличению расхода воды в первом этаже.

Соотношение этих двух факторов может привести к тому, что повышенный расход воды будет происходить в приборах как верхних, так и нижних этажей.

Размер разрегулировки в системе с нижней разводкой (так же, как и в системе с верхней разводкой) зависит от расчетного расхода тепла нагревательными приборами. Чем этот расход больше, тем размер разрегулировки меньше; в частности, при расчетном расходе тепла нагревательными приборами, равном 1500 *ккал/час*, система не имеет разрегулировки даже при расчетной температуре наружного воздуха (—30°).

Двухтрубная система с нижней разводкой в отношении ее регулировки является, следовательно, более благоприятной, чем подобная же система с верхней разводкой.

Полученные на рис. 14 результаты дают основание предполагать, что и при более высоких температурах наружного воздуха тепловой и гидравлический режимы системы с нижней разводкой будут отличаться в лучшую сторону от тех же режимов системы с верхней разводкой.

Определить распределение расходов воды и температур по этажам системы с нижней разводкой (рис. 13) при температуре наружного воздуха $t'_н = +10°$ и при расчетном расходе воды на нагревательный прибор в 60 *кг/час* можно по уравнениям (41—44), в которых следует в этом случае принять $G'_0 = 240$ *кг/час*, $G_1 = G_2 = 60$ *кг/час*, $t'_1 = 30{,}8$, $t'_н = +10°$, в соответствии с чем e и f будут иметь следующие значения:

$$e = \frac{25 \times (20 - 30{,}8) \times 60}{129 + 2{,}48} = -72,$$

$$f = \frac{25 \times 60}{129 + 2 \times 48} = 6{,}65.$$

Выведенное выше уравнение будет в этом случае иметь следующее значение:

$$14{,}08 \times 10^{-3} G_1'^4 - 5{,}38\, G_1'^3 + 652{,}2\, G_1'^2 - 22\,759\, G'_1 - 186\,815 = 0.$$

Решение полученного уравнения дает следующее распределение расходов воды между приборами первого и второго этажей: $G'_1 = 80$ *кг/час* и $G'_2 = 40$ *кг/час*, в соответствии с чем по уравнению (37):

$$t'_{21} = \frac{30{,}8 \times 80 - 72}{80 + 6{,}65} = 27{,}6°,$$

$$t'_{22} = \frac{30{,}8 \times 40 - 72}{40 + 6{,}65} = 24{,}8°.$$

По найденным температурам воды после нагревательных приборов нетрудно определить по уравнению (36) и внутренние температуры помещений:

$$t'_{в1} = \frac{48 \times 30{,}8 + 48 \times 27{,}6 + 129 \times 10}{129 + 2 \times 48} = 18{,}2°,$$

$$t'_{в2} = \frac{48 \times 30{,}8 + 48 \times 24{,}8 + 129 \times 10}{129 + 2 \times 48} = 17{,}5°.$$

Полученные результаты показывают, что имевшее место при расчетной температуре наружного воздуха равномерное распределение расходов воды между вторым и первым этажом (61 *кг/час* и 59 *кг/час*) при температуре наружного воздуха +10° резко нарушается (80 *кг/час* для прибора первого этажа и 40 *кг/час* для прибора второго этажа).

Такое расхождение расходов воды по этажам не привело, однако, к соответственному расхождению внутренних температур, которые и в этом случае остались близкими друг к другу: $t'_{в1} = 18{,}2°$ и $t'_{в} = 17{,}5°$.

В отличие от системы с верхней разводкой более высокая внутренняя температура здесь не во втором этаже, а в первом.

Распределение расходов воды и температур по этажам для различных расходов тепла нагревательными приборами и температур наружного воздуха приведено в табл. 8 и на рис. 15.

Таблица 8

Разрегулировка двухтрубной системы с нижней разводкой при изменении температуры наружного воздуха и расхода воды в ней

Расход воды в стояке, *кг/час*	$t_н = -30$		$t_н = -10$		$t_н = +10$	
	$t'_{в1}$	$t'_{в2}$	$t'_{в1}$	$t'_{в2}$	$t'_{в1}$	$t'_{в2}$
$G_0 = 120$	13,7	19,7	16,8	18,7	18,0	18,0
$G_0 = 160$	16,2	19,1	17,7	18,2	18,2	17,8
$G_0 = 240$	17,9	18,1	18,3	17,5	18,2	17,5

Сравнение полученных результатов с результатами аналогичного исследования системы с верхней разводкой показывает, что во всех случаях тепловой и гидравлический режим двухтрубной системы с нижней разводкой оказывается более благоприятным по сравнению с системой с верхней разводкой.

Полученный результат одновременно показывает, что если система имеет равномерное распределение расходов воды

и температур по этажам при низких температурах наружного воздуха, то у такой системы вполне удовлетворительный режим и при всех других температурах. Поэтому нельзя считать правильной встречающуюся в некоторых организациях практику учета в гидравлических расчетах трубопроводов только 50%

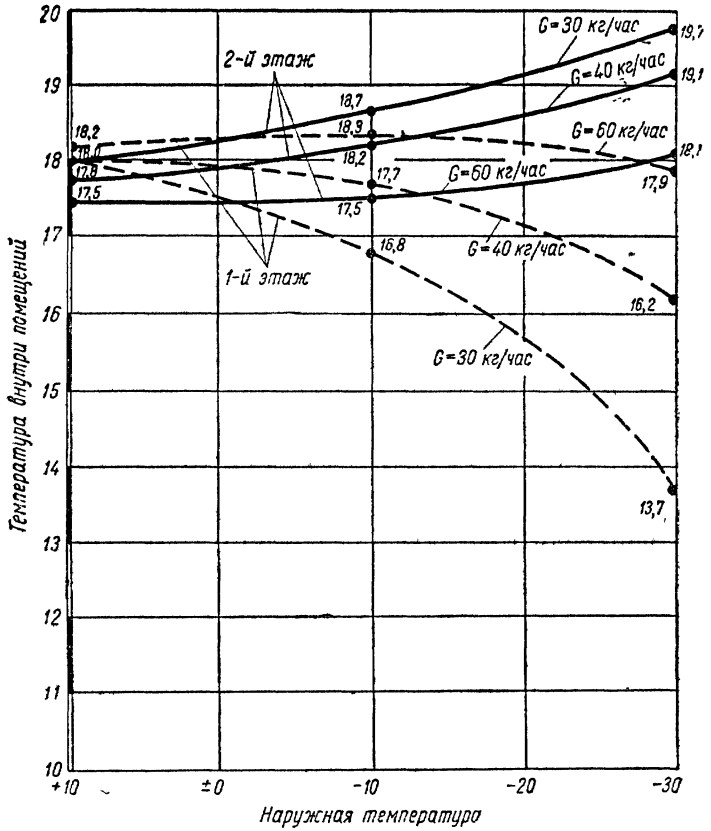


Рис. 15. Разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с нижней разводкой в зависимости от изменения наружной температуры

действующего в системе гравитационного напора. Полученные результаты показывают, что при гидравлических расчетах трубопроводов наиболее важна увязка гравитационных напоров в их максимуме.

Аналогичных результатов можно ожидать от анализа теплового и гидравлического режима в многоэтажных зданиях.

Многоэтажные двухтрубные системы с нижней разводкой имеют более короткие циркуляционные кольца через приборы нижних этажей, чем такие же системы с верхней разводкой,

и поэтому они могут иметь остаточные напоры не только в приборах верхних этажей, но и в приборах нижних этажей (самым неблагоприятным является прибор первого этажа). В этих системах, в зависимости от расчетных расходов тепла отдельными нагревательными приборами и принятых диаметров

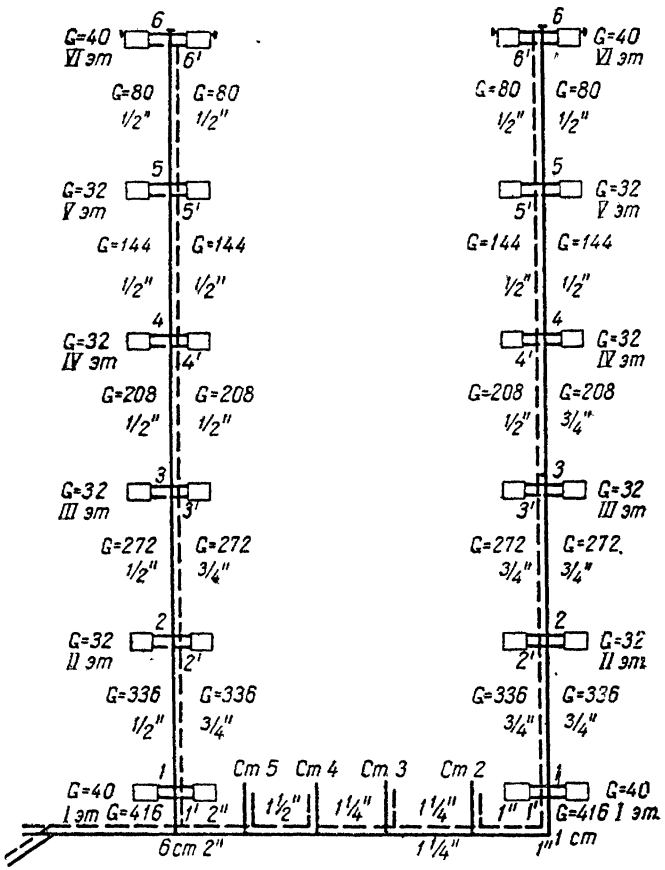


Рис. 16. Схема двухтрубной шестиэтажной системы с нижней разводкой

труб, перегрев может получиться не только в верхних, но и в нижних этажах (в особенности в первом), причем на распределение расходов воды и температур в значительной степени будет влиять температура наружного воздуха и, соответственно, температура теплоносителя.

На рис. 16 изображена двухтрубная система водяного отопления в шесть этажей с нижней тупиковой разводкой, полученная из схемы (рис. 7) заменой в ней верхней разводки

магистральных труб нижней разводкой и с сохранением в стояках тех же диаметров труб.

Результаты гидравлического расчета самого дальнего — первого стояка приводятся в табл. 9.

Таблица 9

Показатели (*мм вод. ст.*)	Этаж					
	I	II	III	IV	V	VI
Располагаемый напор	79 5	129,5	179,5	229,5	279,5	329,5
Сопротивление	35,0	102,5	145,5	220,5	279,5	298,0
Остаточный напор	44,5	27,0	34,0	9,0	0,0	31,5

Табл. 9 показывает, что остаточные напоры получились относительно небольшими и каждый из них будет составлять не более 10% от общего напора системы. Результаты расчета самого ближнего — шестого стояка приводятся в табл. 10.

Таблица 10

Показатели (*мм вод. ст.*)	Этаж					
	I	II	III	IV	V	VI
Располагаемый напор	277,5	327,5	377,5	427,5	477,5	527,5
Сопротивление	37,5	230,5	359,5	482,5	541,5	560,0
Остаточный напор	+245,0	+107,0	+18,0	—55,0	—64,0	—32,5

Рассмотрение данных табл. 10 показывает, что в шестом стояке, поскольку система принята тупиковой, не получилось достаточно удовлетворительной увязки располагаемых напоров и сопротивлений трубопровода.

Из табл 10 видно, что приборы первого и второго этажей имеют значительные избытки располагаемого напора, в то время как в трех верхних этажах около 10% располагаемого напора нехватает. Нехватку напоров в верхних этажах можно было бы ликвидировать увеличением диаметров труб, однако здесь это не сделано умышленно, для уменьшения размеров горизонтальной разрегулировки.

Без всякого дальнейшего расчета ясно, что в этом стояке приборы первых двух этажей во всех случаях, т. е. при всех температурах наружного воздуха, будут перегреваться, если не будет осуществлена регулировка системы кранами.

Для определения возможных размеров разрегулировки приборов первого стояка, в котором результат гидравлического

расчета получился более удовлетворительным, необходимо рассмотреть (аналогично многоэтажной системе с верхней разводкой) систему уравнений, которая, с учетом ранее найденных значений характеристик гидравлического сопротивления участков, примет следующий вид:

$$1)\ 11{,}7\times10^{-3}G_6^2-1{,}3\times10^{-3}\cdot G_5^2=\frac{200}{G_6};$$

$$2)\ 11{,}7\times10^{-3}(G_6+G_5)^2+1{,}3\times10^{-3}G_5^2-1{,}3\times10^{-3}G_4^2=$$

$$=\frac{3600}{G_6+G_5};$$

$$3)\ 6{,}24\times10^{-3}(G_6+G_5+G_4)^2+1{,}3\times10^{-3}G_4^2-$$

$$-1{,}3\times10^{-3}G_3^2=\frac{5200}{G_6+G_5+G_4};$$

$$4)\ 2{,}16\times10^{-3}(G_6+G_5+G_4+G_3)^2+1{,}3\times10^{-3}G_3^2-$$

$$-1{,}3\times10^{-3}G_3^2=\frac{6800}{G_6+G_5+G_4+G_3};$$

$$5)\ 2{,}16\times10^{-3}(G_6+G_5+G_4+G_3+G_2)^2+1{,}3\times10^{-3}G_2^2-$$

$$-1{,}3\times10^{-3}\times G_1^2=\frac{8400}{G_6+G_5+G_4+G_3+G_2};$$

$$6)\ G_6+G_5+G_4+G_3+G_2+G_1=208\ кг/час. \qquad (44')$$

Решением приведенной системы уравнений можно найти тот расход воды, который установится в каждом нагревательном приборе при расчетной температуре наружного воздуха, если остаточные напоры по этажам не будут погашены регулировочными кранами. Результаты решения указанной выше системы уравнений приведены в табл. 11 и на рис. 17.

Таблица 11

Показатели	Этаж					
	I	II	III	IV	V	VI
Расчетный расход воды, *кг/час* . .	40	32	32	32	32	40
Фактический расход воды по расчету разрегулировки, *кг/час* . . .	49	16	47	28	12	56
Фактический расход воды, в % к расчетному	123	50	147	87	38	140
Внутренняя температура, град. . .	18,2	13,6	19,6	17,3	11,1	19,7

Из табл. 11 видно, что, несмотря на то, что остаточные напоры в первом стояке (рис. 16) были относительно небольшими и не превышали 10% от общего напора системы, расхождение расходов воды по этажам и внутренних температур при расчетной температуре наружного воздуха получилось значительным.

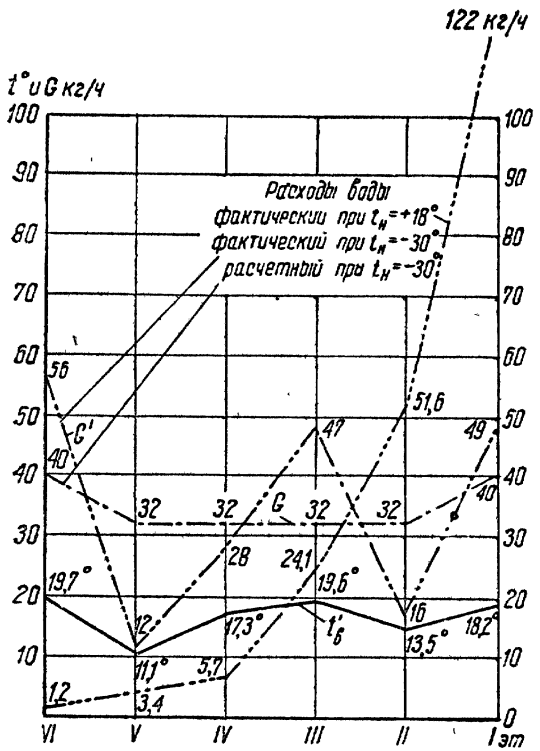


Рис. 17. Тепловой и гидравлический режим шестиэтажной системы с нижней разводкой

На схеме рис. 18 приведен стояк двухтрубной системы водяного отопления с нижней разводкой, заснятый в одном из домов, присоединенных к тепловым сетям гор. Москвы.

Эта схема интересна тем, что все радиаторы на стояках соединены попарно сцепками, что вызывает увеличенные расходы воды этими стояками; однако вместе с увеличением нагрузки стояка, проектировщики увеличили и диаметры труб, что уменьшило возможность получения более устойчивого гидравлического режима, присущего этой системе, вследствие более высоких расходов воды в стояках.

В данной системе, по крайней мере на трех этажах, можно было принять трубы диаметром на номер меньше, что, как указывалось выше, значительно повысило бы ее гидравлическую и тепловую устойчивость.

Результаты решения по схеме рис. 18 системы уравнений (44′) приведены в табл. 12.

Табл. 12 показывает, что отклонения расходов воды и соответственных внутренних температур от расчетных по этажам получились значительными.

Наиболее низкая внутренняя температура (10,6°) оказалась в первом этаже, наиболее высокая (19,9°) — не в шестом, а в четвертом этаже.

Сопоставление данных табл. 12 с диаметрами труб (см. рис. 18) показывает, что перерасход воды происходит во всех

Таблица 12

Показатели	Расположение прибора по этажам					
	I	II	III	IV	V	VI
Расчетный расход воды, *кг/час* . .	110	80	80	80	80	120
Фактический расход воды по расчету разрегулировки, *кг/час* . . .	39	48	82	132	115	124
Фактический расход воды в % к расчетному	36	60	102	165	144	103
Внутренняя температура, град. . . .	10,6	15,0	18,2	19,9	19,5	18,2

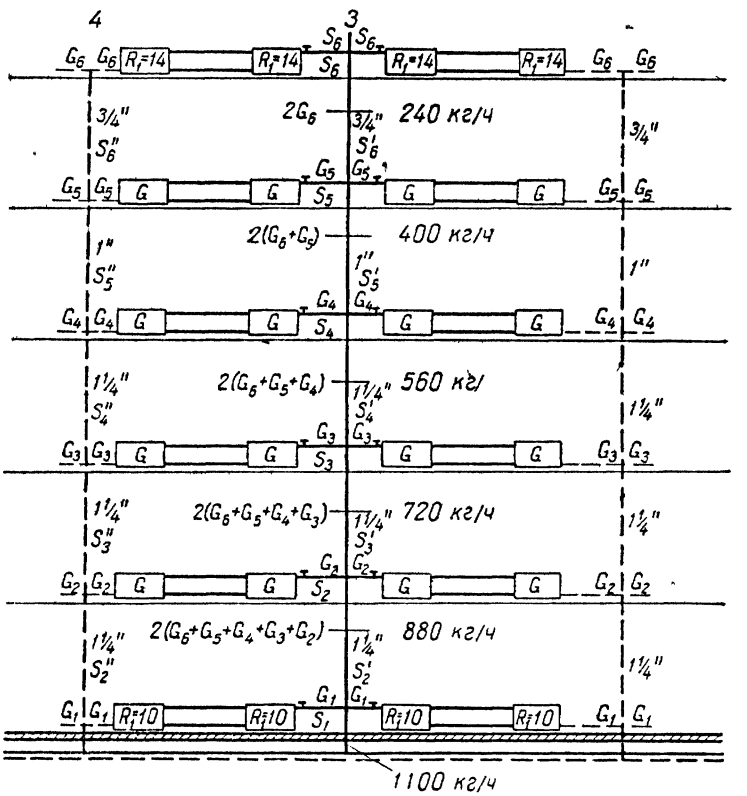


Рис. 18. Схема двухтрубной шестиэтажной системы с нижней разводкой

случаях, когда в обратных трубах по ходу движения воды имеется переход с одного диаметра трубы на следующий, больший.

Расчетные данные табл. 12 получены для максимальной температуры теплоносителя (95°), при которой влияние гравитационного напора является наиболее интенсивным. При сни-

жении температуры теплоносителя гравитационный напор будет уменьшаться, в соответствии с чем по этажам произойдет и перераспределение расходов воды.

Новое распределение расходов воды по этажам может быть найдено решением приведенной выше системы уравнений (44′), в которой потребуется лишь изменить в соответствии с новыми условиями величину гравитационного напора.

Решение упомянутой выше системы уравнений для температуры наружного воздуха +10° и начальной температуры воды +31° приведены в табл. 13.

Таблица 13

Показатели	Расположение приборов по этажам					
	I	II	III	IV	V	VI
Расчетный расход воды, *кг час* . .	110	80	80	80	80	120
Фактический расход воды по расчету разрегулировки, *кг/час* . . .	135	84	80	90	74	77
Фактический расход воды в % к расчетному	123	105	100	112	93	64
Внутренние температуры, град. . .	18,2	18,1	18,0	18,1	17,9	17,5

Табл. 13 показывает, что, вследствие уменьшения величины гравитационного напора, расход воды по сравнению с данными табл. 12 значительно сократился в приборах верхних этажей и значительно увеличился в приборах нижних этажей (в особенности в приборе первого этажа).

Внутренние температуры по этажам стали весьма близкими друг к другу, что объясняется уменьшением отклонения расходов воды от нормы при низких температурах теплоносителя. Особенно показательны в этом отношении приборы шестого этажа, в которых сокращение расхода воды до 64% нормы привело к отклонению внутренней температуры всего на 0,5° от нормы.

Все расчетные данные по разрегулировке стояка рис. 18 приведены на рис. 19.

Приведенные выше таблицы показывают, что все рассмотренные двухтрубные системы водяного отопления не свободны от вертикальной разрегулировки, хотя она при нижней разводке (в одинаковых условиях) получается несколько меньшей, чем при верхней разводке.

То обстоятельство, что в системах с нижней разводкой имеется тенденция к перегреву, при низкой температуре наружного воздуха, приборов верхних этажей, а при высоких температурах наружного воздуха—приборов нижних этажей, может создать при средних температурах отопительного сезона удовлетворительные, достаточно близкие к нормам условия работы.

Из всех приведенных выше примеров видно, что на распределение расходов воды по этажам в двухтрубных системах водяного отопления вообще и в системах с нижней разводкой в особенности влияет переменная величина гравитационного напора.

Весьма важно установить распределение расходов воды по этажам, когда влияние гравитационного напора будет отсутствовать, т. е. когда величина гравитационного напора будет равна нулю.

Знание распределения расходов воды по этажам при минимальной температуре наружного воздуха и распределения расходов воды при отсутствии влияния гравитационного напора дает возможность найти тот предел, к которому стремится система по гидравлическому режиму по мере повышения температуры наружного воздуха от расчетной до комнатной.

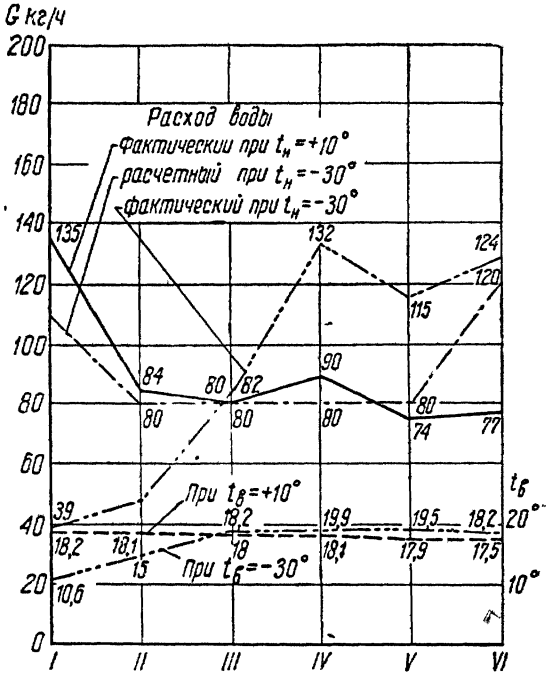


Рис. 19. Тепловой и гидравлический режим в стояке шестиэтажной системы водяного отопления с нижней разводкой

Если величина гравитационного напора равна нулю, то система уравнений (44′) может быть построена следующим образом:

$$\left(4S_6' + 4S_6'' + S_6\right) G_6^2 = S_5 G_5^2,$$

откуда

$$G_5 = \sqrt{\frac{4S_6' + 4S_6'' + S_6}{S_5}}\, G_6 = \nu_5 G_6, \qquad (44'')$$

где

$$\nu_5 = \sqrt{\frac{4S_6' + 4S_6'' + S_6}{S_5}}.$$

Последующее уравнение, на основании уже выведенных равенств, определится:

$$4\left(S_5' + S_5''\right)(1+\nu_5)^2 G_6^2 + S_5 \nu_5^2 G_6^2 = S_4 G_4^2,$$

откуда можно вывести, что:

$$G_4 = \sqrt{\frac{4\left(S_5' + S_5''\right)(1+\nu_5)^2 + S_5\nu_5^2}{S_4}} \cdot G_6 = \nu_4 G_6,$$

где $$\nu_4 = \sqrt{\frac{4\left(S_5' + S_5''\right)(1+\nu_5)^2 + S_5\nu_5^2}{S_4}}$$

. . . . . .

. . . . . .

. . . . . .

$$G_1 = \sqrt{\frac{4\left(S_2' + S_2''\right)(1+\nu_5+\nu_4+\nu_3+\nu_2)^2 + S_2\nu_2^2}{S_1}} \cdot G_6 = \nu_1 G_6,$$

где $$\nu_1 = \sqrt{\frac{4\left(S_2' + S_2''\right)(1+\nu_5+\nu_4+\nu_3+\nu_2)^2 + S_2\nu_2^2}{S_1}}.$$

Из последнего равенства системы уравнений можно вывести, что:

$$G_6 = \frac{\Sigma G}{1+\nu_5+\nu_4+\nu_3+\nu_2+\nu_1}.$$

По найденному расходу воды в шестом этаже и по выведенным выше значениям коэфициентов нетрудно определить расход воды и во всех прочих этажах.

Пусть, например, требуется определить распределение расходов воды по этажам в первом стояке (см. рис. 16), характеристики гидравлических сопротивлений трубопроводов которого были уже найдены при решении системы уравнений 40 и 44'.

По найденным значениям характеристик гидравлического сопротивления первого стояка можно найти по приведенным выше уравнениям и значения коэфициентов распределения по этажам расходов воды, которые оказываются следующими:

$$\nu_5 = \sqrt{\frac{4\times 1{,}3 + 4\times 1{,}3 + 1{,}3}{1{,}3}} = 3{,}0;$$

$$\nu_4 = \sqrt{\frac{4\times 2{,}6\times(1+3{,}0)^2 + 1{,}3\times 3^2}{1{,}3}} = 5{,}0;$$

$$\nu_3 = \sqrt{\frac{4\times 1{,}57\times(1+3+5)^2 + 1{,}3\times 5^2}{1{,}3}} = 21;$$

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{4\times 0{,}54\times(1+3+5+21)^2 + 1{,}3\times 21^2}{1{,}3}} = 45;$$

$$\nu_1 = \sqrt{\frac{4\times 0{,}54\times(1+3+5+21+45)^2 + 1{,}3\times 45^2}{1{,}3}} = 107.$$

По найденным коэфициентам распределения расходов воды по этажам нетрудно найти и самые расходы. В частности, расход воды через прибор шестого этажа оказывается равным:

$$G_6 = \frac{208}{1+3+5+21+45+107} = 1{,}2 \ кг/час.$$

Полученный результат показывает, что если в рассматриваемом стояке гравитационный напор сократится до нуля и все краны у приборов при этом будут полностью раскрыты, то в этом случае через прибор верхнего шестого этажа будет протекать расход воды всего в размере 1,2 *кг/час*, что составляет всего 3,0% к расчетному расходу.

Расходы воды по всем остальным этажам также легко могут быть найдены. Результаты расчета даны в табл. 14.

Таблица 14

Показатели	Расположение приборов по этажам					
	I	II	III	IV	V	VI
Расчетный расход воды, *кг/час* . .	40	32	32	32	32	40
Фактический расход воды по расчету разрегулировки, *кг/час* . . .	122	51,6	24,1	5,7	3,4	1,2
Фактический расход воды в % к расчетному	382	162	75,0	18,0	10,6	3,0

Рассмотрение полученных результатов, нанесенных на график фиг. 17, показывает, что в пределе при отсутствии гравитационного напора и при открытых кранах весь основной расход воды проходит через приборы нижних этажей, сокращаясь до минимума в приборах верхних этажей. В частности, в рассмотренном примере более половины расхода воды всего стояка проходит через приборы первого этажа.

При повышении температуры теплоносителя и увеличении гравитационного напора расход воды в приборах верхних этажей будет увеличиваться и, как показывают табл. 11 и график рис. 17, при температуре теплоносителя, равной расчетной (95°), достигает 140% нормы.

Табл. 11 и 14 показывают, таким образом, те пределы изменения расхода воды по этажам, которые будут иметь их приборы в зависимости от изменений температуры теплоносителя.

Как видно из приведенных таблиц, предел этих изменений весьма широк, что не может быть отнесено к положительной оценке рассматриваемых систем.

Это значит, в частности, что всякий раз, когда система будет вводиться в эксплоатацию в начале отопительного сезона

или при вынужденных перерывах или даже при изменениях ее режима, распределение потоков воды по этажам всегда будет происходить вначале с большими отклонениями от нормы.

При проектировании двухтрубных систем водяного отопления с нижней разводкой и насосным побуждением очень часто напор насоса подбирают исходя из преодоления сопротивлений лишь в магистральных (разводящих) трубопроводах. Расчет стояков в этом случае ведется на естественную (гравитационную) циркуляцию.

Целесообразность такого метода расчета может быть проверена сравнением работы первого и шестого стояков схемы рис. 20 при изменении в них температурных режимов. Диаметры труб первого стояка обеспечивают заданные в нем расходы воды при естественной циркуляции, в то время как шестой стояк во всех случаях будет требовать для своей работы насосного побуждения.

Предполагается, что в обоих стояках при расчетной температуре наружного воздуха по всем этажам и приборам выдерживается заданное распределение расходов воды.

Расчетное распределение расходов воды по приборам может быть получено регулировкой нагревательных приборов кранами, характеристика гидравлического сопротивления которых по заданному им расходу воды легко может быть найдена из выражения

$$S = H \cdot G^{-2}$$

для прибора первого этажа и из выражения

$$S = \left[H - (S' + S'')\, G_{cm}^2\right] \cdot G^{-2}$$

для приборов всех остальных этажей. Значения букв здесь те же, что и в ранее выведенных уравнениях.

В соответствии с принятыми обозначениями характеристика гидравлического сопротивления прибора первого этажа, при величине его гравитационного напора равной 4 *мм вод. ст.*, будет следующей:

$$S_1 = 4 \times 40^{-2} = 2{,}5 \times 10^{-3}$$

и, соответственно, прибора второго этажа при величине его гравитационного напора, равной 58 *мм вод. ст.*:

$$S_2 = (58 - 0{,}47 \times 10^{-3} \times 336^2) \times 32^{-2} = 5 \times 10^{-3}.$$

Подобным же образом определяются характеристики гидравлических сопротивлений (труб и кранов) остальных приборов:

$$S_3 = 3{,}3 \times 10^{-3} \quad S_4 = 22{,}6 \times 10^{-3}$$

$$S_5 = 13{,}6 \times 10^{-3} \quad S_6 = 34{,}8 \times 10^{-3}$$

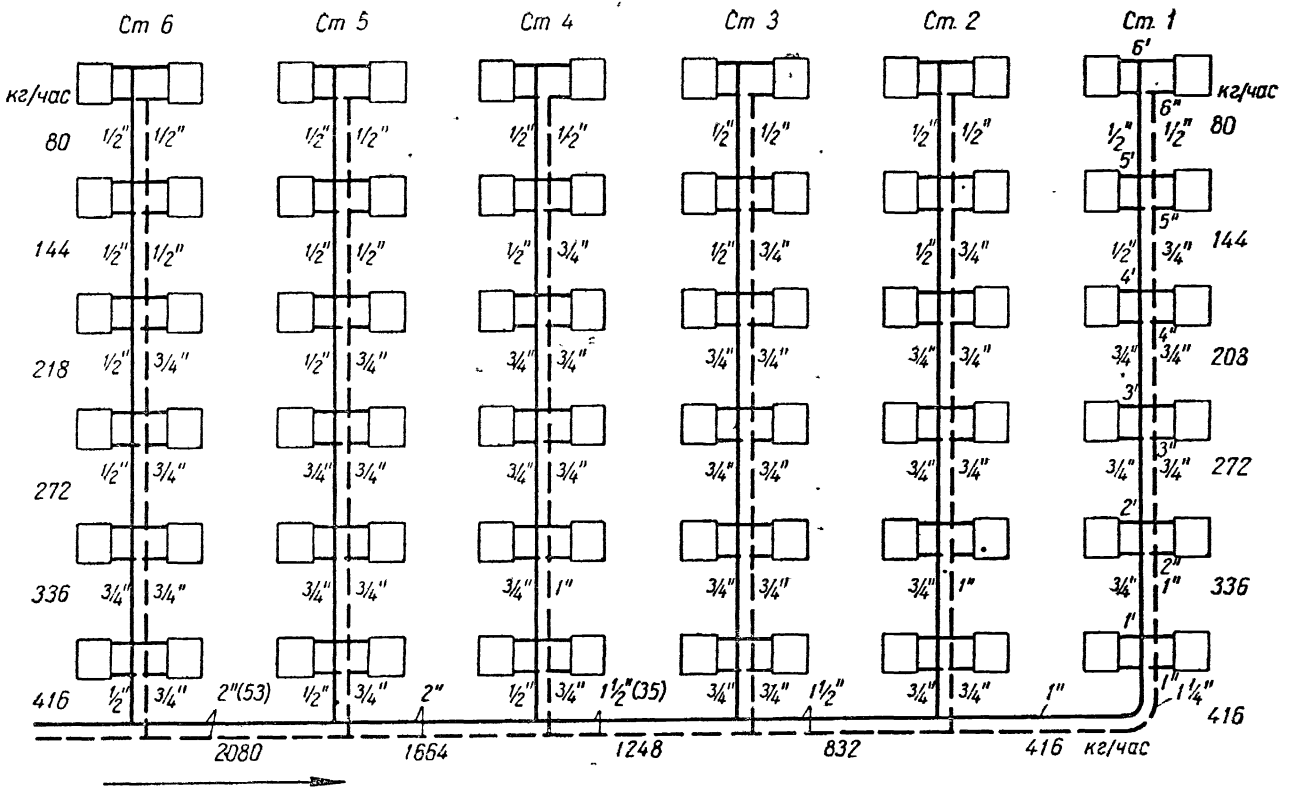


Рис. 20. Схема двухтрубной шестиэтажной системы водяного отопления с нижней разводкой

В приведенных выше расчетах, согласно указанным в первом стояке рис. 20 диаметрам подающих и обратных труб было принято:

$$S_2'' = 0{,}10 \times 10^{-3},$$

$$S_2' = S_3' = S_4' = S_5'' = S_4'' = S_3'' = 0{,}37 \times 10^{-3},$$

$$S_5' = S_6' = S_6'' = 1{,}76 \times 10^{-3}.$$

Распределение расчетных расходов воды по всем этажам и приборам в шестом стояке не может быть обеспечено за счет естественной циркуляции. Принятые в этом стояке диаметры труб (см. рис. 20) требуют дополнительного напора от насоса примерно в размере 200 *мм вод. ст.*

В этом случае характеристики гидравлических сопротивлений приборов по этажам будут следующими:

$$S_1 = 128 \times 10^{-3}; \quad S_2 = 171 \times 10^{-3}; \quad S_3 = 72{,}5 \times 10^{-3};$$

$$S_4 = 30{,}4 \times 10^{-3}; \quad S_5 = 15{,}7 \times 10^{-2}; \quad S_6 = 32{,}2 \times 10^{-3}$$

и, соответственно, характеристики гидравлических сопротивлений основных труб стояка:

$$S_2' = S_2'' = S_3'' = S_4'' = 0{,}37 \times 10^{-3},$$

$$S_3' = S_4' = S_5' = S_6' = S_6'' = S_5'' = 1{,}76 \times 10^{-3}.$$

Найденные значения характеристик гидравлического сопротивления всех участков труб обоих рассматриваемых стояков дают возможность определить распределение расходов воды в них и при температурном режиме, отличном от расчетного.

Ранее выполненный анализ показывает, что такое распределение расходов воды проще всего установить для случая, когда величина гравитационного напора становится равной нулю, что может быть в конце отопительного сезона при $t_н = +18°$.

В обоих рассматриваемых вариантах методики расчета стояков двухтрубной системы отопления с нижней разводкой магистральных труб предполагается наличие насосного побуждения, величина которого по отношению к гравитационному напору в большинстве случаев будет неизмеримо большей. В этом случае можно принять, тем более для проводимого исследования, что общий расход воды в стояке остается постоянным, тогда распределение расходов воды в стояке по этажам в условиях отсутствия гравитационного напора может быть в обоих вариантах найдено решением системы уравнений (44′).

Решение этой системы уравнений на основе полученных выше характеристик гидравлического сопротивления участков трубопроводов обоих стояков приводит к следующему распределению расходов воды по этажам (табл. 15).

Таблица 15

Показатели	Этажи					
	I	II	III	IV	V	VI
Расчетный расход воды в приборах, *кг/час*	40	32	32	32	32	40
Расход воды при отсутствии гравитационного напора при расчете стояка на естественную циркуляцию, *кг/час*	109	47,2	31,1	9,2	7,5	4 0
То же, в % к расчетному расходу воды	270	148	97	29	23	10
Расход воды при отсутствии гравитационного напора при расчете стояка по насосной системе, *кг/час*	48	38	38	38	28	18
То же, в % к расчетному расходу воды	120	119	119	119	87	45

Полученные результаты показывают, что шестой стояк, в расчете которого в дополнение гравитационного напора использован напор насоса в размере 200 *мм вод. ст.*, в гидравлическом отношении оказывается более устойчивым по сравнению с первым стояком, рассчитанным только на естественную циркуляцию. Следовательно, расчет стояков двухтрубной системы с нижней разводкой на естественную циркуляцию целесообразен только с точки зрения возможности более точной первоначальной увязки по этажам располагаемых напоров.

Это положение хорошо иллюстрируют табл. 9 и 10, из которых видно, что первый стояк (табл. 9) имеет по этажам относительно небольшие напоры, в то время как стояк *6* (табл. 10) имеет в приборах первых этажей исключительно большие избытки напора.

В целом все проведенные исследования показывают, что двухтрубные системы как с верхней разводкой, так и с нижней, в гидравлическом отношении являются, во-первых, трудно регулируемыми из-за наличия в них больших остаточных (расчетных) напоров и, во-вторых, установленный в них гидравлический режим вследствие изменений величины гравитационного напора не сохраняется постоянным.

Некоторые мероприятия, которые могут повысить гидравлическую устойчивость двухтрубных систем водяного отопления, исследуются в разделе VI.

III. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ РАЗРЕГУЛИРОВКА ДВУХТРУБНЫХ СИСТЕМ

1. Горизонтальная разрегулировка при верхней разводке

Помимо вертикальной разрегулировки стояков двухтрубной системы по этажам, в водяных системах отопления иногда имеет место и горизонтальная разрегулировка системы по стоякам. Горизонтальная разрегулировка стояков возникает, главным образом, вследствие того, что гидравлические сопротивления отдельных колец по стоякам, так же, как гидравлические сопротивления отдельных приборов в стояке, между собой не уравнены. При расчете отдельных стояков, так же, как и отдельных приборов, в некоторых стояках получаются остаточные напоры и, следовательно, увеличенные расходы воды при соответственном снижении расхода воды в других стояках. Снижение расхода воды в стояке ведет к повышенному ее охлаждению и, следовательно, к дальнейшему увеличению влияния гравитационного напора, к еще большей неравномерности прогрева системы.

Определение влияния горизонтальной разрегулировки на неравномерность прогрева системы и сравнение этого влияния с влиянием вертикальной разрегулировки необходимо для уяснения происходящих в системе явлений.

Пусть, например, имеется какая-то двухтрубная система водяного отопления, для которой необходимо определить влияние на равномерность прогрева горизонтальной разрегулировки. Система предполагается симметричной как по строительным размерам, так и по тепловым расходам, что не имеет принципиального значения, но значительно упрощает расчеты.

Для упрощения исследования целесообразно заменить стояки с трубами разного диаметра одной трубой, которая была бы эквивалентна по сопротивлению и пропускной способности всему стояку в целом.

Эквивалентный диаметр для каждого стояка может быть найден из выражения:

$$d_x = kG_{ст}^{0,38} \cdot h_x^{-0,19},$$

где k можно принять, по данным проф. Б. Л. Шифринсона, равным 3,3.

Расход воды в стояке $G_{ст} = 2nG$, следовательно,

$$d_x = 3,3\,(2nG)^{0,38} \cdot h_x^{-0,19} = 4,3\,(nG)^{0,38} \cdot h_x^{-0,19},$$

где n — число этажей.

Принятое упрощение позволяет заменить всю сложную двухтрубную систему водяного отопления весьма простой схемой

(рис. 21) с найденными по расчету нестандартными диаметрами труб.

Согласно предыдущему,

$$H_{уч} = \frac{500 \cdot G^2}{d^{5,25}} \cdot l_{пр} = S_{уч} \cdot G^2_{уч},$$

где: $S = \frac{500}{d^{5,25}} \cdot l_{пр}$ есть характеристика гидравлического сопротивления рассматриваемого участка трубопровода.

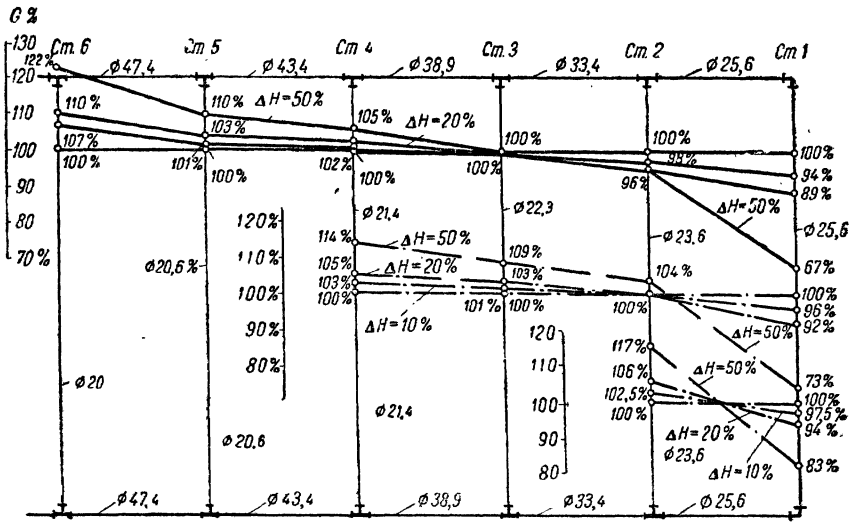


Рис. 21. Схема двухтрубной системы водяного отопления с верхней разводкой при замене в ней стояков одной трубой эквивалентного сопротивления

Принятое выражение и схема рис. 21 дают в этом случае возможность составить для любой отопительной установки следующую систему уравнений:

$$S_2 G_2^2 = S_1' G_1^2 + S_1 G_1^2,$$

$$S_3 G_3^2 = S_2' (G_2 + G_1)^2 + S_1' G_1^2 + S_1 G_1^2,$$

$$S_4 G_4^2 = S_3' (G_3 + G_2 + G_1)^2 + S_2' (G_2 + G_1)^2 + S_1' G_1^2 + S_1 G_1^2, \quad (45)$$

. . . . . .

. . . . . .

$$S_n G_n^2 = S_{n-1}' \left(\sum_1^{n-1} G_x \right)^2 + S_{n-2}' \left(\sum_1^{n-2} G_x \right)^2 + \ldots + S_1' G_1^2 + S_1 G_1^2,$$

$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots + G_{n-1} + G_n;$$

здесь: G_1, G_2, G_3, G_4 и т. д. — расходы воды в стояках, *кг/час*;

S_1, S_2, S_3, S_4 и т. д. — характеристики гидравлических сопротивлений стояков;

S_1', S_2', S_3', S_4' и т. д. — характеристики гидравлических сопротивлений подходящих к стоякам магистралей.

Из первого уравнения приведенной системы можно определить расход воды во втором стояке в зависимости от расхода воды в первом:

$$G_2 = G_1\sqrt{\frac{S_1'+S_1}{S_2}} = \nu_2 \cdot G_1 .$$

Подставляя найденную зависимость расхода воды во втором стояке во второе уравнение, получим:

$$G_3 = \nu_3 \cdot G_1 ,$$

где

$$\nu_3 = \sqrt{\frac{S_2'(\nu_2+1)^2+(S_1'+S_1)}{S_3}} .$$

Подставляя полученное равенство в третье уравнение и дальнейшие, соответственно получим:

$$G_4 = \nu_4 \cdot G_1 ,$$

$$\text{где: } \nu_4 = \sqrt{\frac{S_3'(\nu_3+\nu_2+1)^2+S_2'(\nu_2+1)^2+(S_1'+S_1)}{S_4}} , \quad (45')$$

$$G_n = \nu_n \cdot G_1 ,$$

$$\text{где: } \nu_n =$$

$$= \sqrt{\frac{S_{n-1}'(\nu_{n-1}+\nu_{n-2}+\ldots+1)^2+\ldots+S_2'(\nu_2+1)^2+(S_1'+S_1)}{S_n}} .$$

Последнее уравнение системы будет иметь следующее значение:

$$G_0 = (1+\nu_2+\nu_3+\nu_4+\ldots+\nu_{n-1}+\nu_n)\,G_1 .$$

Расход воды в первом стояке определится следующим выражением:

$$G_1 = \frac{G_0}{1+\nu_2+\nu_3+\nu_4+\ldots+\nu_{n-1}+\nu_n} . \quad (45'')$$

По найденному значению расхода воды в первом стояке определяются расходы воды и в других стояках.

Пусть требуется определить гидравлический режим двухтрубной системы водяного отопления, в каждом стояке которой имеются остаточные напоры.

Число стояков пусть будет ограничено вначале двумя (см. рис. 21). Для определения диаметров схемы необходимо прежде всего найти удельное падение напора. Если считать, что общий напор во всей системе будет равен 1000 *мм вод. ст.*, то в шестиэтажной системе, при двух стояках и при средних строительных размерах здания, какие обычно имеют место, удельное падение напора может быть примерно равным 6,25 *мм вод. ст.* в первом стояке и 9,55 *мм* во втором.

По найденным падениям напора и принимая $G = 40$ *кг/час*, можно определить эквивалентные диаметры обоих стояков:

$$d_1 = 4{,}3\,(nG)^{0{,}38} \cdot h_1^{-0{,}19} = 4{,}3\,(6 \times 40)^{0{,}38} \times 6{,}25^{-0{,}19} = 24{,}3 \text{ мм},$$

$$d_2 = 4{,}3\,(6 \times 40)^{0{,}33} \times 9{,}55^{-0{,}19} = 22{,}4 \text{ мм}.$$

Найденные эквивалентные диаметры труб дают возможность определить для обоих стояков величины характеристик гидравлического сопротивления. Для первого стояка:

$$S_1' + S_1 = 500 \cdot d^{-5{,}25} \cdot l_{пр} = 500 \times 24{,}3^{-5{,}25} \times 34{,}8 \times 2 =$$

$$= 1{,}85 \times 10^{-3}.$$

Если при расчете системы установленный диаметр второго стояка S_2^{∂} окажется, как это очень часто случается, несколько больше необходимого по расчету, то, следовательно, характеристика гидравлического сопротивления его будет меньше расчетной, что можно выразить следующим равенством:

$$S_2^{\partial} = x \cdot S_2,$$

где x в этом случае всегда меньше единицы.

При величине остаточного напора, равной 10% ($x = 0{,}9$), распределение расходов воды между вторым и первым стояками может быть найдено весьма просто — решением приведенной выше системы уравнений (45):

$$0{,}9 \times 1{,}85 \times 10^{-3} \times G_2'^2 = 1{,}85 \times 10^{-3} \times G_1'^2,$$

$$G_2' + G_1' = G_2 = G_1 = 2G_1,$$

откуда

$$G_1' = 0{,}975\,G_1 \text{ и } G_2' = 1{,}025\,G_1;$$

при $x = 0{,}8$ $G_1' = 0{,}94\,G_1$ и $G_2' \cdot 1{,}06\,G_1$,

при $x = 0{,}5$ $G_1' = 0{,}83\,G_1$ и $G_2' - 1{,}17\,G_1$.

Полученный результат показывает, что при двух стояках заметная разница в расходах воды по стоякам может иметь место только при наличии во втором стояке значительного остаточного напора.

Следует учесть, что, как видно из расчета, на перераспределение расходов воды между стояками оказывает влияние только степень использования в стояках располагаемого напора, а этажность здания и абсолютная величина удельной потери напора не оказывают никакого влияния.

Исходя из указанного обстоятельства, можно для сокращения расчетов при увеличении числа стояков в системе не определять вновь удельных падений напоров, а в дополнение к уже проведенным расчетам определить эквивалентные диаметры и характеристики гидравлического сопротивления для третьего, четвертого, пятого и шестого стояков при удельных падениях напора в схеме рис. 21.

В результате соответствующих расчетов в стояках определятся следующие удельные напоры: $h_1 = 4{,}8$; $h_2 = 7{,}3$; $h_3 = 3{,}8$; $h_4 = 12{,}4$; $h_5 = 14{,}9$ и $h_6 = 17{,}4$ *мм вод. ст.*

По указанным удельным падениям напора определятся эквивалентные диаметры стояков: $d_1 = 25{,}6$ *мм*; $d_2 = 23{,}6$; $d_3 = 22{,}3$; $d_4 = 21{,}4$; $d_5 = 20{,}6$ и $d_6 = 20{,}0$ *мм* и эквивалентные диаметры магистральных трубопроводов между вторым и третьим стояками $\left(d_2'\right)$, между третьим и четвертым $\left(d_3'\right)$ и т. д. $d_2' = 33{,}4$ *мм*; $d_3' = 38{,}9$ *мм*; $d_4' = 43{,}4$ и $d_5' = 47{,}4$ *мм*.

Соответствующие величины характеристик гидравлического сопротивления составят:

$$S_1' + S_1 = 1{,}4 \times 10^{-3}; \quad S_2 = S_1' + S_1 = 1{,}4 \times 10^{-3};$$

$$S_3' = 1{,}91 \times 10^{-3}; \quad S_4 = 2{,}38 \times 10^{-3}; \quad S_5 = 2{,}88 \times 10^{-3}$$

$$\text{и } S_6 = 2{,}94 \times 10^{-3};$$

$$S_2' = 0{,}12 \times 10^{-3}; \quad S_3 = 0{,}054 \times 10^{-3}; \quad S_4' = 0{,}03 \times 10^{-3}$$

$$\text{и } S_5' = 0{,}019 \times 10^{-3}.$$

Остается составить и решить систему уравнений (45′), предполагая наличие в стояках различных остаточных напоров.

Если указанные напоры составят 10%, то $\nu_2 = 1{,}05$; $\nu_3 = 1{,}06$; $\nu_4 = 1{,}065$; $\nu_5 = 1{,}07$ и $\nu_6 = 1{,}14$.

По найденным величинам можно определить перераспределение расходов воды по стоякам

$$G_1' = \frac{6G_1}{1 + 1{,}05 + 1{,}06 + 1{,}065 + 1{,}07 + 1{,}14} = 0{,}94\,G_1$$

и, соответственно:

$G_2' = 0{,}98G_1$; $G_3' = G_1$; $G_4' = G_1$; $G_5' = 1{,}01G_1$ и $G_6' = 1{,}07G_1$.

При $x = 0{,}8$ $\nu_2 = 1{,}08$; $\nu_3 = 1{,}12$; $\nu_4 = 1{,}14$; $\nu_5 = 1{,}15$; $\nu_6 = 1{,}24$.

Следовательно,

$$G_1' = \frac{6G_1}{1 + 1{,}08 + 1{,}12 + 1{,}14 + 1{,}15 + 1{,}24} = 0{,}89G_1,$$

откуда $G_2' = 0{,}96G_1$; $G_3' = G_1$; $G_4' = 1{,}02G_1$; $G_5' = 1{,}03G_1$ и $G_6' = 1{,}10G_1$.

Полученный результат показывает, что увеличение числа стояков до шести при наличии во всех пяти стояках остаточных напоров в размере 20% привело к недорасходу воды против нормы в первых двух стояках — в первом на 11% и во втором на 4%, при перерасходе воды в четвертом стояке на 2%, в пятом на 3% и в шестом на 10%.

При наличии остаточных напоров в размере 50% $x = 0{,}5$; $\nu_2 = 1{,}42$; $\nu_3 = 1{,}49$; $\nu_4 = 1{,}56$; $\nu_5 = 1{,}63$ и $\nu_6 = 1{,}80$, следовательно,

$$G_1' = \frac{6G_1}{1 + 1{,}42 + 1{,}49 + 1{,}56 + 1{,}63 + 1{,}80} = 0{,}67G_1,$$

откуда $G_2' = 0{,}96G_1$; $G_3' = G_1$; $G_4' = 1{,}05G_1$; $G_5' = 1{,}10G_1$ и $G_6 = 1{,}22\,G_1$.

Рассмотрение полученных результатов показывает, что в этом случае расход воды в первом стояке уменьшился уже на 33% и, соответственно, увеличение расхода воды в шестом стояке возросло до 22% (см. рис. 21).

Проведенный анализ показывает, что значительная горизонтальная разрегулировка может создаться в системе водяного отопления с верхней разводкой лишь в результате наличия по стоякам больших остаточных напоров. Данный пример показывает, что использование в стояках располагаемого напора в размере 80% привело к уменьшению расхода воды в первом стояке на 11%; это говорит о том, что наличие в стояках реальных систем небольших остаточных напоров не будет иметь существенного влияния на их разрегулировку.

При проведении изложенного выше анализа не учитывалось влияние гравитационного напора.

В тех стояках, где будет происходить уменьшение расхода воды, гравитационный напор будет увеличиваться и соответственно в них возрастет расход воды; обратное положение будет иметь место в тех стояках, где расход воды будет возрастать.

Перераспределение расходов воды между стояками будет тем самым как бы затормаживаться. Вместе с тем снижение в стояке расхода воды приведет к более интенсивному охлаждению ее, что, во-первых, усилит в стояке вертикальную разрегулировку (вследствие увеличения влияния гравитационного напора) и, во-вторых, снизит теплоотдачу нагревательных приборов нижних этажей.

Для выяснения возможных практических размеров горизонтальной разрегулировки и совместного влияния в системе обеих разрегулировок (горизонтальной и вертикальной) рассмотрена двухтрубная система водяного отопления для шести этажей с шестью стояками, представленная на рис. 7.

Расчет схемы рис. 7, не представляющий интереса, в настоящей работе не приводится; полученные в результате расчета диаметры показаны на схеме.

Для решения поставленной выше задачи, так же как и в предыдущих исследованиях, необходимо найти для каждого стояка эквивалентный диаметр. Так как в рассматриваемом примере диаметры всех участков трубопроводов уже заданы и на ряде участков имеет место параллельная прокладка двух труб (подающей и обратной), то эквивалентный диаметр должен быть определен несколько иначе. Как известно, расход воды в трубопроводе определяется равенством:

$$G = \sqrt{\frac{d^{5,25} \cdot H}{k \cdot l}}.$$

Для замены двух труб одной общей необходимо, чтобы

$$G_0 = G_1 + G_2$$

или

$$\sqrt{\frac{d_0^{5,25}\cdot H}{k\cdot l}} = \sqrt{\frac{d_1^{5,25}\cdot H}{k\cdot l}} + \sqrt{\frac{d_2^{5,25}\cdot H}{k\cdot l}}. \qquad (46)$$

Следовательно, для замены двух параллельно работающих участков стояка одним должно быть соблюдено равенство

$$d_0^{2,625} = d_1^{2,625} + d_2^{2,625}. \qquad (46')$$

На рис. 7 показано два варианта параллельного начертания трубопроводов — две трубы диаметром по 15,75 *мм* ($^1/_2''$) и две трубы диаметрами 15,75 *мм* ($^1/_2''$) и 21,25 *мм* ($^3/_4''$), в соответствии с чем

$$d_{01}^{2,625} = 2 \times 15{,}75^{2,625} = 2790,$$

откуда

$$d_{01} = 20{,}6 \ мм$$

и, соответственно,

$$d_{02}^{2,625} = 15{,}75^{2,625} + 21{,}25^{2,625} = 4456,$$

откуда

$$d_{02} = 24{,}5 \ мм.$$

После нахождения приведенных диаметров для двух параллельно работающих труб нетрудно найти средний приведенный диаметр для всего стояка в целом. Все подводки к приборам из приводимых ниже расчетов исключены, что возможно, поскольку все подводки во всех стояках одного и того же диаметра:

$$d_1 = \frac{27 \times 4 + 5 \times 24{,}5 \times 3{,}4}{21{,}0} = 24{,}9 \ мм.$$

Аналогично определятся среднеприведенные диаметры труб других пяти стояков:

$$d_2 = \frac{21{,}25 \times 4 + 5 \times 24{,}5 \times 3{,}4}{21} = 23{,}9 \ мм,$$

$$d_3 = \frac{21{,}25 \times 4 + 4 \times 24{,}5 \times 3{,}4 + 20{,}6 \times 3{,}4}{21} = 23{,}7 \ мм,$$

$$d_4 = \frac{21{,}25 \times 4 + 3 \times 24{,}5 \times 3{,}4 + 2 \times 20{,}6 \times 3{,}4}{21} = 23{,}5 \ мм,$$

$$d_5 = \frac{21{,}25 \times 4 + 2 \times 24{,}5 \times 3{,}4 + 3 \times 20{,}6 \times 3{,}4}{21} = 23{,}3 \ мм.$$

$$d_6 = \frac{21{,}25 \times 4 + 24{,}5 \times 3{,}4 + 4 \times 20{,}6 \times 3{,}4}{21} = 23{,}1 \ мм.$$

Найденные диаметры труб дают возможность заменить схему рис. 7 схемой рис. 22.

По найденным эквивалентным диаметрам труб можно определить соответствующие характеристики гидравлического сопротивления:

$$S_1 = 500 \times 24{,}9^{-5{,}25} \times 21 \times 2 = 0{,}98 \times 10^{-3},$$
$$S_2 = 500 \times 23{,}9^{-5{,}25} \times 21 \times 2 = 1{,}21 \times 10^{-3},$$
$$S_3 = 500 \times 23{,}7^{-5{,}25} \times 21 \times 2 = 1{,}29 \times 10^{-3},$$
$$S_4 = 500 \times 23{,}5^{-5{,}25} \times 21 \times 2 = 1{,}33 \times 10^{-3},$$

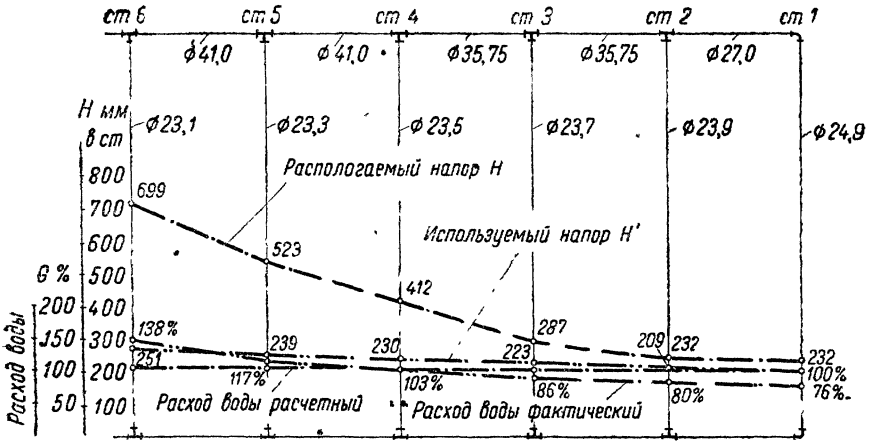


Рис. 22. Схема двухтрубной системы водяного отопления с верхней разводкой при замене в ней стояков одной трубой эквивалентного сопротивления

$$S_5 = 500 \times 23{,}3^{-5{,}25} \times 21 \times 2 = 1{,}38 \times 10^{-3},$$
$$S_6 = 500 \times 23{,}1^{-5{,}25} \times 21 \times 2 = 1{,}45 \times 10^{-3}$$

и, соответственно, для магистральных участков трубопроводов

$$S_1' = 500 \times 27{,}0^{-5{,}25} \times 8 \times 1{,}5 \times 2 = 0{,}36 \times 10^{-3},$$
$$S_2' = S_3' = 500 \times 35{,}75^{-5{,}25} \times 8 \times 1{,}5 \times 2 = 0{,}08 \times 10^{-3},$$
$$S_4' = S_5' = 500 \times 41{,}0^{-5{,}25} \times 8 \times 1{,}5 \times 2 = 0{,}04 \times 10^{-3}.$$

На рис. 7 дано графическое изображение остаточных напоров, которые получились у нагревательных приборов в каждом этаже, однако это не дает представления о том, какой остаточный напор получается при этом во всем стояке в целом.

Найденные для рассматриваемой системы (рис. 7) эквивалентные стоякам диаметры труб и их характеристики гидравлического сопротивления дают возможность определить остаточные напоры для стояков.

Исходное для расчета сопротивление первого стояка может быть определено по формуле:

$$\Sigma (Rl+Z)_1 = \left(S_1 + S_1'\right) G_1^2 = (0{,}98+0{,}36) \times 10^{-3} \times 416^2 = 232 \text{ мм вод. ст.}$$

Соответственно этому сопротивления всех других стояков, при том условии, что расход воды в каждом из них будет равен расчетному расходу воды, должны были быть следующими:

$$\Sigma (Rl+Z)_1 = \Sigma (Rl+Z)_2 = 232 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_3 = \Sigma (Rl+Z)_2 + S_2' G_2'^2 =$$

$$= 232 + 0{,}08 \times 10^{-3} \times 832^2 = 287 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_4 = \Sigma (Rl+Z)_3 + S_3' G_3'^2 =$$

$$= 287 + 0{,}08 \times 10^{-3} \times 1248^2 = 412 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_5 = 412 + 0{,}04 \times 10^{-3} \times 1664^2 = 523 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_6 = 523 + 0{,}04 \times 10^{-3} \times 2080^2 = 699 \text{ мм вод. ст.}$$

Такими должны были быть сопротивления во всех шести стояках, если бы расходы воды в них соответствовали расчетным, а их диаметры соответствовали их расходам и располагаемым напорам. Найденные выше эквивалентные диаметры труб стояков не соответствуют необходимым по расчету, что и ведет к образованию в них остаточных напоров.

Действительные сопротивления стояков, соответствующие найденным выше для них эквивалентным диаметрам и отвечающие одновременно расходам воды, могут быть определены следующим образом:

$$\Sigma (Rl+Z)_2' = S_2 G_2^2 = 1{,}21 \times 10^{-3} \times 416^2 = 209 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_3' = S_3 G_3^2 = 1{,}29 \times 10^{-3} \times 416^2 = 223 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_4' = S_4 G_4^2 = 1{,}33 \times 10^{-3} \times 416^2 = 230 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_5' = S_5 G_5^2 = 1{,}38 \times 10^{-3} \times 416^2 = 239 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Sigma (Rl+Z)_6' = S_6 G_6^2 = 1{,}45 \times 10^{-3} \times 416^2 = 251 \text{ мм вод. ст.}$$

Полученные сопротивления дают возможность определить для каждого стояка величину остаточного напора:

$$\Delta H_2 = \frac{H_2 - H_2'}{H_2} \times 100 = \frac{232 - 209}{232} \times 100 = 10\%,$$

$$\Delta H_3 = \frac{H_3 - H_3'}{H_3} \times 100 = \frac{287 - 223}{287} \times 100 = 22\%,$$

$$\Delta H_4 = \frac{H_4 - H_4'}{H_4} \times 100 = \frac{412 - 230}{412} \times 100 = 44\%,$$

$$\Delta H_5 = \frac{H_5 - H_5''}{H_5} \times 100 = \frac{523 - 239}{523} \times 100 = 54\%,$$

$$\Delta H_6 = \frac{H_6 - H_6'}{H_6} \times 100 = \frac{699 - 251}{699} \times 100 = 64\%.$$

Эти результаты весьма интересны, так как они показывают, какими большими могут быть остаточные напоры в больших многоэтажных системах даже при относительно хорошей загрузке стояков. На схеме рис. 7 верхние и нижние приборы имеют расчетные расходы тепла по 1000 *ккал/час*, а все средние приборы по 800 *ккал/час*. Тем не менее полученные выше результаты показывают, что только в первых двух стояках — во втором и в третьем — располагаемые напоры использованы достаточно полно, начиная же с четвертого стояка остаточные напоры весьма существенны.

В четвертом стояке оказалось использованным только 55% располагаемого напора, в пятом — 46% и в шестом — только 36%.

Таков результат расчета двухтрубной системы водяного отопления (рис. 7) из-за наличия переменного и дифференцированного расхода воды в отдельных участках трубопроводов системы, а также наличия ограниченного по размерам диаметров сортамента труб, применяемых в практике отопительной техники. Остаточные напоры изображены на графике (рис. 22).

После определения в системе (рис. 22 и 7) величин остаточных напоров и всех характеристик гидравлического сопротивления нетрудно найти распределение расходов воды между отдельными стояками.

Коэфициенты распределения этого расхода определяются уравнением (45′) и будут, соответственно, следующими:

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{S_1' + S_1}{S_2}} = \sqrt{\frac{1{,}34}{1{,}21}} = 1{,}05,$$

$$\nu_3 = \sqrt{\frac{0{,}08 \times 2{,}05^2 + 1{,}34}{1{,}29}} = \sqrt{\frac{1{,}68}{1{,}29}} = 1{,}14,$$

$$\nu_4 = \sqrt{\frac{0{,}08 \times 3{,}14^2 + 1{,}68}{1{,}33}} = \sqrt{\frac{2{,}49}{1{,}33}} = 1{,}37,$$

$$\nu_5 = \sqrt{\frac{0{,}04 \times 4{,}56^2 + 2{,}49}{1{,}38}} = \sqrt{\frac{3{,}32}{1{,}38}} = 1{,}55,$$

$$\nu_6 = \sqrt{\frac{0{,}04 \times 6{,}11^2 + 3{,}32}{1{,}45}} = \sqrt{\frac{4{,}81}{1{,}45}} = 1{,}82.$$

Найденные коэфициенты распределения расходов воды дают возможность легко раскрыть окончательную картину гидравлического режима в рассматриваемой двухтрубной системе водяного отопления, если в этой системе никакой регулировки ни по стоякам, ни по нагревательным приборам произведено не будет. По уравнению (45″)

$$G_1' = \frac{6\,G_1}{1 + 1{,}05 + 1{,}14 + 1{,}37 + 1{,}55 + 1{,}82} = 0{,}76\,G_1$$

и, соответственно, $G_2' = 0{,}80\,G_1$; $G_3' = 0{,}86\,G_1$; $G_4' = 1{,}03\,G_1$; $G_5' = 1{,}17\,G_1$; $G_6' = 1{,}38\,G_1$.

Полученный результат показывает, что в результате наличия в стояках остаточных напоров, которые в рассматриваемой системе по ряду стояков оказались весьма большими (см. график рис. 22), получилось значительное расхождение и расходов воды.

Как видно из последних итоговых цифр, несоответствие гидравлических сопротивлений системы по отдельным расчетным кольцам имеющимся в этих кольцах нагрузкам привело, в результате горизонтальной разрегулировки, к уменьшению расхода воды в первом стояке на 24%, во втором на 20% (несмотря на наличие в нем остаточного напора), в третьем на 14% и к увеличению расхода воды в четвертом на 3%, в пятом на 17% и в шестом на 38%. Разница в расходах воды между крайними стояками оказалась почти двукратной (см. рис. 22). Необходимо отметить, что, в отличие от вертикальной разрегулировки, которая в течение всего отопительного сезона изменяется по величине в довольно значительных размерах в зависимости от температуры наружного воздуха и соответственной температуры теплоносителя, горизонтальная разрегулировка (поскольку здесь влияние гравитационного напора не учитывалось) будет более или менее постоянной при всех температурах наружного воздуха.

Более того, горизонтальная разрегулировка расходов воды при высоких температурах наружного воздуха будет несколько возрастать, поскольку при низких температурах наружного воздуха уменьшенный расход воды в крайних стояках будет

увеличивать в них влияние гравитационного напора. В ближних стояках, наоборот, влияние гравитационного напора уменьшит увеличенный расход воды, что, соответственно, будет несколько затормаживать горизонтальную разрегулировку стояков.

Чтобы определить, насколько велико будет в системе затормаживающее влияние гравитационного напора, целесообразно рассмотреть гидравлический режим крайних стояков (шестого и первого), в которых, как это было установлено выше, разница в расходах воды получилась наибольшей.

При работе двух стояков с распределением между ними тех расходов воды, которые были получены выше, и при отсутствии действия в них гравитационного напора должно иметь место равенство:

$$S_6 (1{,}38 \times G_1)^2 = S_1 (0{,}76\, G_1)^2,$$

в котором: S_6 и S_1 — характеристики гидравлического сопротивления участков трубопроводов по схеме рис. 22;

G_1 — расчетный расход воды по стоякам.

Значение характеристики гидравлического сопротивления шестого стояка было найдено ранее:

$$S_6 = 1{,}45 \times 10^{-3}.$$

Шестой стояк предполагается неизменным, т. е. тех же диаметров, что и схема рис. 22, что, соответственно, дает возможность определить значение коэфициента гидравлического сопротивления для первого стояка:

$$S_1' = \frac{1{,}45 \times 10^{-3} \times 1{,}38^2}{0{,}76^2} = 4{,}78 \times 10^{-3}.$$

Перераспределение расходов воды в стояках по сравнению с расчетными расходами нарушит в них равенство гравитационных напоров, в соответствии с чем в обоих стояках установится уже другой расход воды, отличающийся от принятого выше. Новое перераспределение расходов воды произойдет по закону

$$S_6 G_6'^2 - S_1 G_1'^2 = H_н + H_6 - H_н - H_1, \qquad (47)$$

в котором, кроме известных уже величин, дополнительно введены:

$H_н$ — действующий в системе напор от насоса;

H_6 и H_1 — гравитационные напоры в шестом и в первом стояках.

Для решения приведенного выше равенства целесообразно выразить гравитационные напоры обоих стояков в зависимости от их величины H_0 по основному расчету, когда в каждом стояке расход воды соответствовал расчетному расходу воды G. В этом случае, очевидно, можно записать, что:

$$H_6 = \frac{H_0 G}{G_6'} \quad \text{и} \quad H_1 = \frac{H_0 G}{G_1'}.$$

Если теперь в уравнение (47) ввести известные и найденные величины, то оно может быть переписано следующим образом:

$$\left(1{,}45 \times 10^{-3} G_6'^2 - 4{,}78 \times 10^{-3} G_1'^2\right) G_6' \cdot G_1' = \\ = 100 \times 416 \left(G_1' - G_6'\right). \qquad (47')$$

Здесь принято $H_0 = 100$ *мм вод. ст.* и $G = 416$ *кг/час*.

Вторым уравнением, дающим возможность найти неизвестные, будет уравнение равенства расходов воды в обоих вариантах, что может быть выражено следующим образом:

$$G_6' + G_1' = 1{,}38\, G + 0{,}76\, G = 2{,}14\, G. \qquad (48)$$

Совместное решение уравнений (47′) и (48) приводит их к виду:

$$0{,}23 \times 10^9 \times G_1'^4 - 0{,}25 \times 10^9 G_1'^3 - 2 \times 4{,}7 \times 10^9 G_1'^2 + \\ + 73{,}3 \times 10^9 G_1' + 25 = 0, \qquad (49)$$

откуда можно определить искомое распределение расходов воды по стоякам уже с учетом действующих в них гравитационных напоров.

При решении уравнения (49) получилось, что:

$$G_1' = 346 \text{ кг/час} = 0{,}83\, G \quad \text{и} \quad G_6' = 544 \text{ кг/час} = 1{,}31\, G.$$

Рассмотрение полученного результата и сравнение его с предыдущим показывает, что учет гравитационного напора сократил перерасход воды в шестом стояке с 38% до 31% и соответственно уменьшил недостаток расхода воды в первом стояке с 76% до 83%. Изменение достаточно существенно, оно достигает почти 30%.

2. Горизонтальная разрегулировка при нижней разводке

Наличие в стояках системы отопления с нижней разводкой магистральных труб остаточных напоров приводит их, естественно, так же, как и системы с верхней разводкой, к горизонтальной разрегулировке.

Показанная на рис. 20 двухтрубная система водяного отопления в шесть этажей с нижней разводкой аналогична системе с верхней разводкой, изображенной на рис. 7.

Принятые в результате произведенного гидравлического расчета диаметры труб показаны на схеме.

Остаточные напоры в *мм вод. ст.* по стоякам и этажам иллюстрируются табл. 16.

Таблица 16

Этаж	Стояки					
	1	2	3	4	5	6
I	+ 1,5	+ 4,0	+ 40,0	— 5,0	+ 58,5	+ 85,0
II	+ 12,5	+ 1,5	+ 12,0	— 7,5	+ 48,5	+ 79,5
III	+ 29,5	+ 1,5	+ 12,0	— 7,5	+ 64,0	+ 5,5
IV	+ 51,5	+ 24,0	+ 34,0	+ 1,5	+ 47,5	— 10,5
V	+ 8,0	+ 10,5	+ 21,0	+ 1,5	+ 46,5	— 11,5
VI	+ 30,0	+ 32,5	+ 43,0	+ 23,5	+ 89,5	+ 27,5

Табл. 16 показывает, что увязать такую сложную систему во всех направлениях по напорам довольно трудно, так как почти у всех нагревательных приборов имеются остаточные напоры; несколько большие по величине остаточные напоры имеют три стояка (№№ 3, 5 и 6). Величины остаточных напоров в этих стояках (если считать, что общее гидравлическое сопротивление системы будет около 1000 *мм вод. ст.*) не превосходят 10%.

Для возможно большей увязки сопротивлений отдельных стояков с располагаемыми напорами в схеме рис. 20 подводящие к стоякам трубы приняты для ближних стояков более мелких диаметров по сравнению с самими стояками.

Выясним, какое установится распределение расходов воды по стоякам, если регулировка этих стояков не будет произведена. Общий расход воды в системе во всех случаях предполагается равным заданному.

Для решения поставленной задачи необходимо по каждому стояку заменить сопротивления его трубопроводов эквивалентным сопротивлением, способ нахождения которого будет несколько отличаться от такого же в системе с верхней разводкой.

Если рассмотреть схему труб (см. рис. 20) шестого этажа первого стояка от тройника $6'$ на подающей трубе до тройника $6''$ на обратной, то на основании уравнения (46′) два параллельных участка труб к приборам шестого этажа могут быть заменены одной с равным в ней падением напора по следующей зависимости:

$$d_{06}^{2,625} = 2\, d_{6}^{2,625},$$

откуда

$$d_{06} = 1{,}3\, d_6 = 1{,}3 \times 15{,}75 = 20{,}4 \text{ мм};$$

здесь: d_6 — диаметр подводящих труб к приборам шестого этажа, *мм*;

d_{06} — диаметр общей трубы, их заменяющей, *мм*.

Так как диаметры труб стояка шестого этажа равны 15,75 *мм*, то для дальнейших расчетов необходимо найти средний приведенный диаметр:

$$d_{пр.\,6} = \frac{6{,}8 \times 15{,}75 + 20{,}4 \times 2{,}5}{9{,}3} = 17{,}00 \text{ м},$$

где: 6,8 — длина подающего и обратного стояков, *м*,

2,5 — длина труб от стояка до прибора, *м*.

Рассматривая участки труб в том же стояке от крестовины $5'$ до крестовины $5''$, на основании уравнения (46) можно записать:

$$\frac{d_{05}^{2{,}625}}{9{,}3^{05}} = \frac{d_{пр.\,6}^{2{,}625}}{9{,}3^{0{,}5}} + \frac{d_{06}^{2{,}625}}{(1{,}3 \times 2{,}5)^{0{,}5}}.$$

В этом равенстве коэфициент 1,3 в знаменателе последнего слагаемого учитывает увеличение доли местных сопротивлений на ответвлениях труб к приборам. По сокращении получается:

$$d_{05}^{2{,}625} = 17^{2{,}625} + 2{,}88^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 6365,$$

откуда

$$d_{05} = 28{,}0 \text{ мм}$$

и $$d_{пр.\,5} = \frac{28{,}0 \times 9{,}3 + 15{,}75 \times 3{,}4 + 21{,}25 \times 3{,}4}{9{,}3 + 3{,}4 + 3{,}4} = 24{,}0 \text{ мм}.$$

Для участков труб от крестовины $4'$ до крестовины $4''$

$$d_{04}^{2{,}625} = 24{,}0^{2{,}625} + 4{,}95^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 10\,320,$$

откуда

$$d_{04} = 33{,}5 \text{ мм}$$

и $$d_{пр\,4} = \frac{33{,}5 \times 16{,}1 + 21{,}25 \times 6{,}8}{16{,}1 + 6{,}8} = 29{,}8 \text{ мм}.$$

Для участков труб от крестовины $3'$ до крестовины $3''$

$$d_{03}^{2{,}625} = 29{,}8^{2{,}625} + 7{,}05^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 14\,700,$$

откуда

$$d_{03} = 38{,}3 \text{ мм}$$

и $$d_{пр\,3} = \frac{38{,}3 \times 22{,}9 + 21{,}25 \times 6{,}8}{22{,}9 + 6{,}8} = 34{,}4 \text{ мм}.$$

Для участков труб от крестовины $2'$ до крестовины $2''$

$$d_{02}^{2,625} = 34,4^{2,625} + 9,15^{0,5} \times 20,4^{2,625} = 18\,900,$$

откуда

$$d_{02} = 42,2 \text{ мм}$$

и $$d_{пр.\,2} = \frac{42,2 \times 29,7 + 21,25 \times 3,4 + 27 \times 3,4}{29,7 + 6,8} = 38,7 \text{ мм}.$$

Для участков труб от крестовины $1'$ до крестовины $1''$

$$d_{01}^{2,625} = 38,7^{2,625} + 11,2^{0,5} \times 20,4^{2,625} = 23\,650,$$

откуда

$$d_{01} = 46,0 \text{ мм}$$

и $$d_{пр.\,1} = \frac{46,0 \times 36,5 + 63 \times 7}{36,5 + 14} = 42,2 \text{ мм}.$$

Эти расчеты показывают, что все трубопроводы первого стояка *1*, включая и подводящие магистральные трубы, могут быть заменены одной трубой диаметром 42,2 *мм* при общей ее длине в 50,5 *м*.

По ходу расчета видно, что могла бы быть выведена любая другая длина эквивалентной трубы, что отразилось бы лишь соответственно на ее диаметре.

Найденные диаметр и длина трубы, эквивалентные первому стояку, дают возможность по уравнению (39) определить характеристику его гидравлического сопротивления, которая получается, соответственно, следующей:

$$S_1 = 500 \times 42,2^{-5,25} \times 50,5 = 73,6 \times 10^{-6}.$$

Второй стояк имеет на всех участках одинаковые диаметры с первым стояком, за исключением труб, которыми этот стояк присоединяется к разводящим магистралям; следовательно, для второго стояка можно сразу записать

$$d_{01} = 46,0 \text{ мм}$$

и, соответственно:

$$d_{пр\ 1} = \frac{46,0 \times 36,5 + 21,25 \times 2}{36,5 + 2} = 44,8 \text{ мм},$$

откуда

$$S_2 = 500 \times 44,8^{-5,25} \times 38,5 = 42,0 \times 10^{-6}.$$

Для третьего стояка расчет можно начинать с крестовин $2'$—$2''$, так как выше диаметры этого стояка одинаковы с диа-

метрами второго и первого стояков. Следовательно, можно записать, что

$$d_{02} = 42{,}2 \text{ мм},$$

откуда

$$d_{пр.\,2} = \frac{42{,}2 \times 29{,}7 + 21{,}25 \times 6{,}8}{36{,}5} = 38{,}3 \text{ мм};$$

крестовина $1'-1''$:

$$d_{01}^{2{,}625} = 38{,}3^{2{,}625} + 11{,}2^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 23\,300,$$

откуда

$$d_{01} = 45{,}6 \text{ мм},$$

$$d_{пр.\,1} = \frac{45{,}6 \times 36{,}5 + 21{,}25 \times 2}{38{,}5} = 44{,}2 \text{ мм}.$$

Для четвертого стояка, имеющего диаметры труб, одинаковые с диаметрами труб второго и первого стояков, можно сразу получить

$$d_{пр.\,1} = \frac{46 \times 36{,}5 + 15{,}75 \times 2}{38{,}5} = 44{,}5 \text{ мм}.$$

Пятый стояк:

$$d_{05} = 28{,}0 \text{ мм},$$

$$d_{пр.\,5} = \frac{28 \times 9{,}3 + 15{,}75 \times 6{,}8}{16{,}1} = 22{,}7 \text{ мм};$$

$$d_{04}^{2{,}625} = 22{,}7^{2{,}625} + 4{,}95^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 9750,$$

$$d_{04} = 33{,}5 \text{ мм},$$

$$d_{пр\ 4} = \frac{33{,}5 \times 16{,}1 + 37 \times 3{,}4}{22{,}9} = 29{,}0 \text{ мм};$$

$$d_{03}^{2{,}625} = 29{,}0^{2{,}625} + 7{,}05^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 14\,380,$$

$$d_{03} = 37{,}9 \text{ мм},$$

$$d_{пр.\,3} = \frac{37{,}9 \times 22{,}9 + 21{,}25 \times 6{,}8}{29{,}7} = 34 \text{ мм};$$

$$d_{01}^{2{,}625} = 34^{2{,}625} + 9{,}15^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 18\,905,$$

откуда

$$d_{02} = 42{,}1 \text{ мм},$$

$$d_{пр.\,2} = \frac{42{,}1 \times 29{,}7 + 21{,}25 \times 6{,}8}{36{,}5} = 38{,}1 \text{ мм};$$

$$d_{01}^{2{,}625} = 38{,}1^{2{,}625} + 11{,}2^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 23\,000,$$

откуда

$$d_{01} = 45{,}2 \text{ мм},$$

$$d_{пр.1} = \frac{45{,}2 \times 36{,}5 + 15{,}75 \times 2}{38{,}5} = 43{,}7 \text{ мм}.$$

Шестой стояк:

$$d_{03} = 37{,}9 \text{ мм},$$

$$d_{пр.3} = \frac{37{,}9 \times 22{,}9 + 37 \times 3{,}4}{29{,}7} = 33{,}4 \text{ мм};$$

$$d_{02}^{2{,}625} = 33{,}4^{2{,}625} + 9{,}15^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 18\,300,$$

$$d_{02} = 41{,}5 \text{ мм},$$

$$d_{пр.2} = \frac{41{,}5 \times 29{,}7 + 21{,}25 \times 6{,}8}{36{,}5} = 37{,}6 \text{ мм};$$

$$d_{01}^{2{,}625} = 37{,}6^{2{,}625} + 11{,}2^{0{,}5} \times 20{,}4^{2{,}625} = 22\,600,$$

$$d_{01} = 45{,}0 \text{ мм},$$

$$d_{пр.1} = \frac{45{,}0 \times 36{,}5 + 15{,}75 \times 2}{38{,}5} = 43{,}5 \text{ мм}.$$

По найденным эквивалентным диаметрам труб нетрудно определить значения характеристик гидравлического сопротивления всех остальных стояков, которые оказываются следующими:

$$S_3 = 44{,}2 \times 10^{-6},$$
$$S_4 = 42{,}9 \times 10^{-6},$$
$$S_5 = 47{,}2 \times 10^{-6},$$
$$S_6 = 48{,}6 \times 10^{-6}.$$

Для решения задачи распределения расходов воды по стоякам необходимо найти дополнительно к найденным характеристикам гидравлического сопротивления стояков характеристики гидравлического сопротивления магистральных участков труб, соединяющих стояки.

Так, например, характеристика гидравлического сопротивления магистральных труб на участке от третьего стояка ко второму (подающих и обратных) при длине их в 6 *м* и диаметре 35,75 *мм* будет иметь следующее значение:

$$S_2' = S_3' = 500 \times 35{,}75^{-5{,}25} \times 12 = 42{,}6 \times 10^{-6}$$

и, соответственно:

$$S_4' = 500 \times 41{,}0^{-5{,}25} \times 12 = 20{,}8 \times 10^{-6},$$

$$S_5' = 500 \times 53{,}0^{-5{,}25} \times 12 = 5{,}35 \times 10^{-6}.$$

По найденным характеристикам гидравлического сопротивления стояков и магистралей нетрудно установить распределение расходов воды по стоякам. Действительно, если через G с соответствующим индексом обозначить расход воды в стояке, который получится в нем в результате горизонтальной разрегулировки; то на основании ранее найденных уравнений (45′) можно записать, что:

$$G_2' = \nu_2 G_1'; \quad G_3' = \nu_3 G_1'; \quad G_4' = \nu_4 G_1'; \quad G_5' = \nu_5 G_1' \text{ и } G_6' = \nu_6 G_1',$$

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{73{,}6}{42{,}0}} = 1{,}49,$$

$$\nu_3 = \sqrt{\frac{42{,}0\,(1{,}49+1)^2 + 73{,}6}{44{,}2}} = 2{,}75,$$

$$\nu_4 = \sqrt{\frac{42 \times 5{,}24^2 + 260 + 73{,}6}{42{,}9}} = 5{,}9,$$

$$\nu_5 = \sqrt{\frac{20{,}5 \times 11{,}1^2 + 1488{,}6}{47{,}2}} = 9{,}2,$$

$$\nu_6 = \sqrt{\frac{5{,}3 \times 20{,}3^2 + 4028}{48{,}6}} = 11{,}3.$$

По найденным коэфициентам на основании уравнения (45″) можно определить расход воды в первом стояке, а затем и во всех остальных:

$$G_1' = \frac{6\,G_1}{1 + 1{,}49 + 2{,}75 + 5{,}9 + 9{,}2 + 11{,}3} = 0{,}19\,G_1.$$

Это показывает, что под влиянием горизонтальной разрегулировки расход воды в первом стояке сократился по сравнению с расчетным до 19%. Соответственно расходы воды в других стояках получаются следующими: $G_2' = 0{,}28\,G_1$; $G_3' = 0{,}51\,G_1$; $G_4' = 1{,}12\,G_1$; $G_5' = 1{,}75\,G_1$ и $G_6' = 2{,}15\,G_1$.

Полученный результат показывает, что, несмотря на то, что в целях уравнивания напоров по стоякам диаметры труб,

присоединяющих стояки к магистральным трубам, были специально приняты относительно небольшими, как это видно из табл. 13, а в стояках были излишки напора, тем не менее размер горизонтальной разрегулировки получился исключительно большим.

Диаметры труб стояков в схеме рис. 20 были подобраны так, чтобы более или менее устранить в них возможность появления вертикальной разрегулировки по этажам. Выравнивание напоров по вертикали привело к некоторому увеличению диаметров труб в нижних этажах по сравнению со схемой рис. 7 при верхней разводке. Кроме того, сам принцип построения схемы с нижней разводкой увеличивает эквивалентные диаметры стояков по сравнению со стояками при верхней разводке; это, в итоге, и привело к тому, что, хотя диаметры соединительных магистралей схемы рис. 20 (нижняя разводка) и приняты несколько бо́льшими по сравнению с теми же диаметрами схемы рис. 7 при верхней разводке, тем не менее размер горизонтальной разрегулировки в схеме с нижней разводкой получился намного больше.

Полученные в результате произведенных расчетов данные сведены в таблицу (см. табл. 17).

Таблица 17

	Порядковый номер стояка					
	1	2	3	4	5	6
Приведенный диаметр стояка до прибора первого этажа, *мм*	46,0	46,0	45,6	46,0	45,2	45,0
Приведенный диаметр стояка, *мм*	42,2	44,8	44,2	44,5	45,2	43,5
Характеристика гидравлического сопротивления стояка $\times 10^6$ . . .	73,6	42,0	44,2	42,9	47,2	48,6
Расход воды в стояке в % к расчетному	19	28	51	112	175	215

Несмотря на то, что приведенные диаметры стояков до приборов первого этажа (вторая строка табл. 17) получились убывающими к шестому стояку, как это и нужно для лучшей увязки напоров, приведенный диаметр всего первого стояка в целом получился самым меньшим, что привело в конечном результате к тому, что характеристика гидравлического сопротивления стояка оказалась высокой и, соответственно, расход воды очень низким.

Все это объясняется еще и тем, что при полученных приведенных диаметрах стояков удельные гидравлические сопротивления оказываются в них ничтожно малыми, измеряемыми долями *мм вод. ст.*; это, соответственно, и привело к столь значительной горизонтальной разрегулировке.

Для улучшения положения необходимо было бы в данном случае увеличить диаметры труб первого стояка и, в первую очередь, диаметры его магистральных (подводящих) труб.

Если в схеме рис. 20 принять те же диаметры труб, что и в схеме рис. 7 с верхней разводкой, и рассчитать всю схему изложенным выше методом с определением по стоякам приведенных эквивалентных диаметров и характеристик их гидравлического сопротивления, то в этом случае распределение расходов воды по стоякам оказывается следующим (табл. 18).

Таблица 18

	Порядковый номер стояка					
	1	2	3	4	5	6
Приведенный диаметр стояка до прибора первого этажа . . .	45,1	45,1	45,1	45,1	45,0	43,1
Приведенный диаметр всего стояка, *мм*	40,0	43,6	43,5	43,7	43,4	41,8
Характеристика гидравлического сопротивления стояка	99×10^{-6}	47×10^{-6}	50×10^{-6}	46×10^{-6}	48×10^{-6}	42×10^{-6}
Расход воды в стояке в % к расчетному . .	19	27	51	108	170	228

Данные табл. 18 и сравнение ее с табл. 17 показывают, что изменение диаметров труб на отдельных участках в стояках в соответствии со схемой рис. 7 в распределение расходов воды заметных изменений не внесло. Полученные результаты показывают, что устранить влияние горизонтальной разрегулировки в двухтрубных системах водяного отопления с нижней тупиковой разводкой можно только за счет принятия более радикальных мер, которые должны были бы привести к более значительному увеличению приведенных выше характеристик гидравлического сопротивления стояков.

Анализ показывает, какой большой неравномерности может достичь распределение расходов воды по отдельным стоякам, если в системе не будет произведено вертикальной и горизонтальной регулировки.

В обоих разобранных примерах три стояка из шести имеют расходы воды значительно ниже нормы, что, естественно, не может обеспечить нормального прогрева отапливаемых ими помещений.

Кроме того, как известно, уменьшение в больших размерах расхода воды (в особенности при низких температурах наружного воздуха и, соответственно, высоких температурах теплоносителя) ведет к усилению вертикальной разрегулировки. Поэтому необходимо выяснить, какая часть общей разрегулировки системы имеет место из-за горизонтальной разрегулировки и какая — из-за вертикальной. Этот вопрос рассматривается в последнем разделе книги, при анализе теплового гидравлического режима системы с попутным движением воды.

IV. ЭКСПЛОАТАЦИОННАЯ РАЗРЕГУЛИРОВКА ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

1. Несоблюдение расчетных температур

В процессе эксплоатации отопительных систем возможны случаи, когда температура теплоносителя не будет соответствовать той, которая при данной температуре наружного воздуха требуется по графику. Следует определить, какое влияние окажет такое отклонение на тепловой режим отопительной системы и на равномерность прогреваемости системы в отдельных ее звеньях.

Любое отклонение температуры теплоносителя от предусмотренной графиком вызывает изменение расхода тепла отопительной системы, а следовательно, и внутренней температуры.

Косвенно этот вопрос был уже затронут во втором разделе настоящей книги при анализе влияния охлаждения воды в трубах на тепловой режим отапливаемых помещений, где было найдено, что соответствующая внутренняя температура определяется из уравнения:

$$t'_в = t_в - \Delta t \frac{t_в - t_н}{t_1 - t_н}, \qquad (50)$$

в котором: $t_в$ и $t'_в$ — расчетная и искомая внутренние температуры;

Δt — величина отклонения температуры теплоносителя от нормы, в ту или другую сторону;

$t_н$ и t_1 — температура наружного воздуха и соответствующая ей температура теплоносителя.

Расчеты показывают, что во всех случаях изменения внутренней температуры происходят по закону

$$t'_в = t_в \pm 0{,}4\,\Delta t,$$

т. е., что, вне зависимости от начальной температуры теплоносителя, каждый градус отклонения ее от нормы отклоняет внутреннюю температуру помещения на 0,4°.

Величина изменения расхода тепла при отклонениях от нормы температуры теплоносителя определяется равенством:

$$\Delta Q = \frac{t_в - t_н}{t_в - t_н}.$$

С учетом выведенного выше значения $t'_в$

$$\Delta Q = 1 \pm \frac{\Delta t}{t_1 - t_н}.$$

При $t_1 = 95$, $t_н = -30°$ и $\Delta t = 1°$

$$\Delta Q = 1 \pm 0{,}008.$$

При $t_1 = 31°$ и $t_н = +10°$

$$\Delta Q = 1 \pm 0{,}05.$$

Полученный результат показывает, что если при температуре наружного воздуха —30° температуру теплоносителя снизить против нормы на 1°, то расход тепла уменьшится на 0,8%. Снижение расхода тепла при температуре наружного воздуха +10° составит в тех же условиях 5%.

При повышении температуры теплоносителя против нормы будет иметь место обратное явление.

Величины изменения расходов тепла для промежуточных температур на 1° изменения температуры теплоносителя приведены в табл. 19.

Таблица 19

Температура наружного воздуха	—30°	—20°	—10°	±0°	+10
Изменение расхода тепла, %	0,8	1,0	1,4	2,1	5,0

В последующем необходимо определить влияние на разрегулировку системы отклонений температур теплоносителя от нормы.

В двухтрубной системе водяного отопления вертикальная разрегулировка стояков образуется вследствие изменений расходов воды по этажам, обусловливаемых неравномерным охла-

ждением воды в нагревательных приборах и соответственным изменением гравитационных напоров.

Интенсивность охлаждения воды в приборах в основном зависит от начальной температуры воды, поступающей в прибор (поскольку установленная поверхность нагрева прибора является для данной системы неизменной).

При отклонении начальной температуры воды от температуры графика изменения температур воды, поступающей в прибор по всем этажам, будут практически одинаковыми. Следовательно, и интенсивность охлаждения этой воды по всем этажам будет одинаковой. Разрегулировка системы в этом случае происходит только вследствие общего изменения в системе гравитационного напора и, следовательно, размеры этой разрегулировки не могут быть значительными. Все это будет, очевидно, справедливо и в отношении однотрубной системы, в которой, так же как и в двухтрубной системе, отклонения температур теплоносителя от требуемых по графику будут снижать или повышать внутреннюю температуру по всем этажам более или менее одинаково.

Изложенное выше можно подтвердить соответствующим анализом теплового и гидравлического режима отопительной системы.

Если, например, рассмотреть двухтрубную систему водяного отопления на два стока (рис. 8), то тепловой и гидравлический режим ее будет определяться системой уравнений (30)—(33′). При анализе поставленного вопроса необходимо принять, что при соблюдении расчетных параметров теплоносителя внутренние температуры второго и первого этажей будут одинаковыми, т. е. система предполагается отрегулированной кранами, благодаря чему обеспечиваются необходимые изменения характеристик гидравлического сопротивления соответствующих трубопроводов.

В данном случае, в отличие от условий, рассмотренных в уравнении (33′):

$$S_2 + 4S_1'' \neq S_1 + 4S_1'.$$

При решении уравнения (33′) для данной схемы было найдено, что

$$S_1 + 4S_1' = 8{,}34 \times 10^{-3}.$$

Тогда уравнение (33′) для приведенных здесь расчетных условий может быть приведено к следующему виду:

$$\left(S_2 + 4S_1''\right)G^2 - 8{,}34 \times 10^{-3}G^2 = 2{,}05\left(t_1 - t_2\right). \qquad (51)$$

Здесь принято, что $G_2 = G_1 = G$, так как система предполагается отрегулированной. Из написанного равенства можно вывести значение характеристики гидравлического сопротивления трубопроводов прибора второго этажа:

$$S_2 + 4S_1'' = 8{,}34 \times 10^{-3} + 2{,}05\left(t_1 - t_2\right) G^{-2}$$

и уравнение (33′) будет иметь в этом случае следующее значение:

$$2{,}05\left(t_1 - t_2\right) G^{-2} \cdot G'^{2} + 4{,}17 \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot G_0 \left(0{,}5nG_0 - 2G_1'\right) =$$

$$= 2{,}2\left(t_1' - t_{22}'\right) - 0{,}15\left(t_1' - t_{21}'\right).$$

Если в найденное уравнение подставить значение температур обратной воды из приборов второго и первого этажей (уравнение 36), то оно будет иметь следующее значение:

$$2{,}05\left(t_1 - t_2\right) G^{-2}\left(0{,}5nG_0 - G_1'\right)^2 + 4{,}17n \cdot 10^{-3} G_0 \left(0{,}5nG_0 - \right.$$

$$\left. - 2G_1'\right) - 2{,}2\left[t_1' - \frac{t_1'\left(0{,}5nG_0 - G_1'\right) + e}{0{,}5nG_0 - G_1' + f}\right] +$$

$$+ 0{,}15\left[t_1' - \frac{t_1' G_1' + e}{G_1' + f}\right] = 0. \qquad (51')$$

Полученное уравнение дает возможность определить тепловой и гидравлический режим рассматриваемой системы при любых температурах теплоносителя.

При расчетных параметрах системы:

$t_1 = 95°$, $t_2 = 70°$, $t_н = t_н' = -30°$, $n = 1{,}0$ (постоянный расход), $G_0 = 120$ *кг/час*

и по уравнению (34).

$$b = 129,\ c = 48 \text{ и } d = 25,$$

тогда:

$$e = \frac{25 \times \left(-60 - t_1'\right) \times 30}{129 + 96}$$

и

$$f = \frac{25 \times 30}{129 + 96}.$$

Если предположить, что при эксплоатации отопительной системы температура теплоносителя будет снижена, например, до уровня 85° вместо расчетных 95°, то в этом случае уравнение (51') примет следующий вид:

$$51{,}25 \times 30^{-2}\left(60 - G_1'\right)^2 + 8{,}34 \times 10^{-3} \times 60\left(60 - 2G_1'\right) - \\ - 174{,}25 + 2{,}2\,\frac{85 \times \left(60 - G_1'\right) - 483{,}3}{63{,}3 - G_1'} - \\ - 0{,}15\,\frac{85G_1' - 483{,}3}{G_1' + 3{,}3} = 0.$$

Решение полученного уравнения приводит к следующему результату:

$$G_1' = 30{,}6 \text{ кг/час и } G_2' = 29{,}4 \text{ кг/час.}$$

Полученный результат показывает, что, несмотря на то, что температура теплоносителя была на 10° ниже расчетной, разница в расходах воды по этажам (даже при минимальном из рассмотренных ранее расходов воды в стояке) получилась весьма незначительной (2%).

По найденному распределению расходов воды на основании уравнений (37) и (36) можно найти обратные температуры воды из приборов и внутренние температуры помещений второго и первого этажей.

В результате решения уравнений (34) и (36) оказывается:

$$t_{22}' = 61{,}6° \text{ и } t_{21}' = 62{,}5°$$

и, соответственно:

$$t_{в2}' = 14{,}1° \text{ и } t_{в1}' = 14{,}3°.$$

Следовательно, расхождение температур получилось незначительным, что подтверждает высказанное ранее предположение.

Все указанное справедливо и для однотрубной системы, в которой отклонения температур теплоносителя от требуемых по графику также будут изменять внутреннюю температуру по всем этажам или в последовательно включенных помещениях одного этажа примерно одинаково.

Косвенным подтверждением последнего положения может служить анализ теплового режима однотрубной системы в предыдущем разделе, в котором было показано, что изменение температур воды в однотрубной системе почти не нарушает равномерности внутренних температур по отдельным этажам и помещениям.

2. Несоблюдение расчетных расходов воды

В процессе эксплоатации отопительных систем (в особенности систем, присоединенных к тепловым сетям) может иметь место несоблюдение расчетных расходов воды, что более опасно, чем несоблюдение расчетных температур воды, так как оно вызывает нарушение равномерности прогрева системы и ее разрегулировку. Несоблюдение расчетных расходов воды будет сказываться в различных системах по-разному. Это явление рассматривается поэтому раздельно как для однотрубных систем, так и для двухтрубных.

Определение изменений режима двухтрубной системы на два этажа (рис. 8) при несоблюдении в ней расчетных расходов воды может быть осуществлено следующим решением уравнений (30) — (33), в которых n — коэфициент изменения расчетного расхода воды—будет переменной величиной:

$$2{,}05\left(t_1-t_2\right)G^{-2}G_2'^2+8{,}34\times10^{-3}nG_0G_2'-2{,}09\times10^{-3}n^2G_0^2-$$
$$-2{,}05t_1'+2{,}2\,\frac{t_1'G_2'+e}{G_2'+f}-0{,}15\,\frac{t_1'\left(0{,}5nG_0-G_2'\right)+e}{0{,}5nG_0-G_2'+f}=0. \quad (52)$$

Полученное уравнение дает возможность определить тепловой и гидравлический режимы рассматриваемой системы рис. 8 для различных параметров воды и при любом изменении ее расхода в системе.

Пусть расчетные условия системы будут следующими: $t_1=t_1'=95°$; $t_2=70°$, $t_н=t_н'=-30°$.

Тогда по уравнению (34): $b=129$, $c=48$, $d=25$
и по уравнению (37)

$$e=\frac{25\times(-155)}{129+96}G=-17{,}2G$$

и

$$f=\frac{25}{129+96}G=0{,}11G.$$

С учетом найденных значений постоянных величин уравнение (52) примет вид:

$$51{,}25G^{-2}G_2'^2+8{,}34\times10^{-3}nG_0G_2'-2{,}09\times10^{-3}n^2G_0^2-194{,}75+$$
$$+2{,}2\,\frac{95G_2'-17{,}2G}{G_2'+0{,}11G}-0{,}15\,\frac{47{,}5nG_0-95G_2'-17{,}2G}{0{,}5nG_0-G_2'+0{,}11G}=0. \quad (52')$$

Ранее анализ теплового и гидравлического режима данной системы производился при расходах воды в пределах от 30

до 60 *кг/час* на один радиатор. В этих же пределах целесообразно провести и настоящий анализ.

Пусть расход воды нагревательным прибором будет равен 30 *кг/час* (750 *ккал/час*): $G = 30$ *кг/час* и $G_0 = 120$ *кг/час*. Тогда выведенное выше уравнение будет иметь следующее значение:

$$0{,}057G_2'^2 + nG_2' - 30n^2 - 194{,}75 + 2{,}2\frac{95G_2' - 516}{G_2' + 3{,}3} -$$

$$- 0{,}15\frac{5700n - 95G_2' - 516}{60n - G_2' + 3{,}3} = 0. \qquad (52'')$$

Пусть $n = 0{,}8$ (сокращение расхода воды против нормы на 20%).

Решение выведенного уравнения приводит к следующим результатам:

$$G_2' = 29 \text{ кг/час и } G_1' = 19 \text{ кг/час};$$

$$t_{22}' = 69{,}3° \text{ и } t_{21}' = 57{,}8°;$$

$$t_{в2}' = 17{,}9° \text{ и } t_{в1}' = 15{,}4°.$$

Полученный результат показывает, что уменьшение расхода воды на 20% против нормы при расчетной температуре наружного воздуха —30° и температуре теплоносителя 95° снизило внутреннюю температуру во втором этаже всего на 0,1°, в то время как в первом этаже внутренняя температура снизилась на 2,6°.

Таким образом, разность температур (размер разрегулировки) составляет 2,5°.

На основании уравнений (31) и (32) по найденным температурам и расходам воды нетрудно определить и уменьшение расхода тепла в обоих этажах, которое оказывается равным:

$$Q_2' = \frac{29 \times (95 - 69{,}3)}{30 \times (95 - 70)} Q = 0{,}993Q_2,$$

$$Q_1' = \frac{19 \times (95 - 57{,}8)}{30 \times (95 - 70)} Q = 0{,}943Q_1.$$

Следовательно, в результате снижения расхода воды в системе на 20% расход тепла во втором этаже снизился всего на 0,7% и в первом — на 5,7%.

При $n = 0{,}6$ (сокращение расхода воды на 40%) получается:

$$G_2' = 27 \text{ кг/час и } G_1' = 9 \text{ кг/час};$$

$$t_{22}' = 67{,}8° \text{ и } t_{21}' = 12{,}3°;$$

$$t_{в2}' = 17{,}5° \text{ и } t_{в1}' = 5{,}7°.$$

Сокращение расхода воды на 40% при тех же температурах теплоносителя (95°) и наружного воздуха (—30°) снижает, следовательно, внутреннюю температуру в первом этаже на +5,7°, в то время как во втором этаже внутренняя температура и в этом случае почти сохраняется в норме (+17,5°).

Если в данном примере учитывать охлаждение воды в трубах, вследствие значительного уменьшения расхода воды в подающем стояке прибора первого этажа, в нем появится дополнительный гравитационный напор, который несколько улучшил бы полученный выше результат.

Аналогично определяется тепловой и гидравлический режим для той же схемы (рис. 8) при любых расходах воды в системе.

Так, например, при $n = 1{,}2$ (увеличении расхода воды в системе на 20%) уравнение (52″) будет иметь следующее значение:

$$0{,}057\,G_2'^2 + 1{,}2\,G_2' - 238 + 2{,}2 \times \frac{95\,G_2' - 516}{G_2' + 3{,}3} - 0{,}15 \times \frac{6324 - 95\,G_2'}{75{,}3 - G_2'} = 0,$$

откуда $G_2' = 31$ *кг/час* и $G_1' = 41$ *кг/час*.

Полученный результат показывает, что при увеличенной подаче воды в систему по сравнению с нормой значительно возрос расход воды в первом этаже, в то время как расход воды во втором этаже сохранился почти на прежнем уровне.

По найденным расходам воды по уравнению (37) можно определить:

температуры обратной воды после приборов второго и первого этажей, которые оказываются равными $t_{22}' = 70{,}8°$ и $t_{21}' = 75{,}4°$, и внутренние температуры по уравнению (36):

$$t_{в2}' = \frac{48 \times 95 + 48 \times 70{,}8 - 129 \times 30}{129 + 2 \times 48} = 18{,}2°$$

и

$$t_{в1}' = \frac{48 \times 95 + 48 \times 75{,}4 - 129 \times 30}{129 + 2 \times 48} = 19{,}2°.$$

Ранее было определено, что при уменьшении расхода воды на 20% расхождение внутренних температур между вторым и первыми этажами достигало 2,5°; при том же увеличении расхода воды это расхождение оказалось равным всего 1,0°.

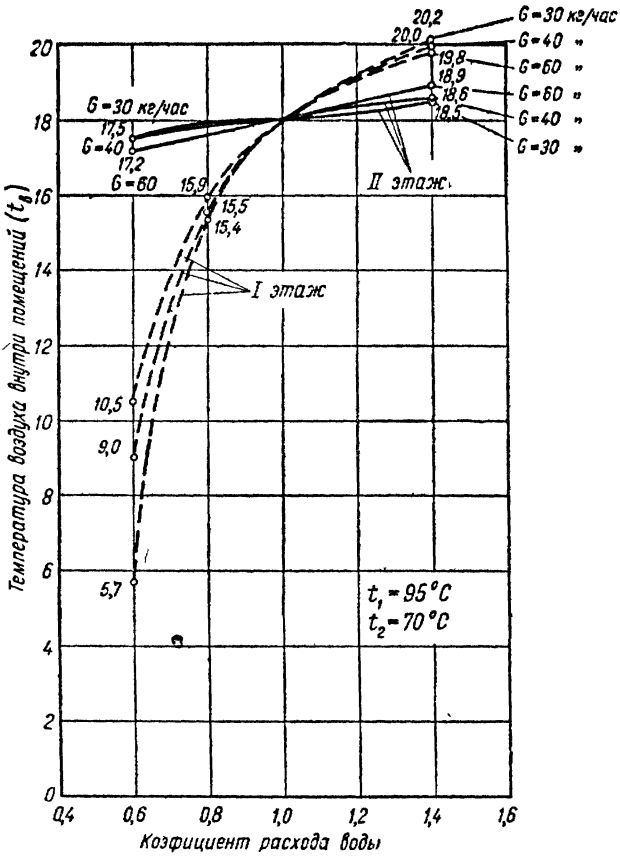


Рис. 23. Изменения внутренних температур из-за несоблюдения расчетных расходов воды в двухтрубной двухэтажной системе с верхней разводкой

Увеличение расхода тепла в этом случае получается, на основании уравнений (31) и (32), следующее:

$$Q_2' = \frac{31 \times (95 - 70{,}8)}{30 \times (95 - 70)} Q_2 = 1{,}005\, Q_2 \text{ (увеличение на 0,5%);}$$

$$Q_1' = \frac{41 \times (95 - 75{,}4)}{30 \times (95 - 70)} Q_1 = 1{,}07\, Q_1 \text{ (увеличение на 7,0%).}$$

Такой результат показывает, что в обоих случаях как при уменьшении расхода воды в системе, так и при его увеличе-

нии, изменение расхода тепла системой не соответствует изменению расхода воды. Это явление объясняется тем, что при уменьшении расхода вода проходит через нагревательные приборы с меньшей скоростью и, следовательно, успевает за одно и то же время отдать больше тепла (больше остывает); при увеличении расхода воды происходит обратное явление.

Распределение расходов воды и температур в той же системе (рис. 8) при других расчетных расходах тепла и воды нагревательными приборами приведено в табл. 20 и 21.

В табл. 20 и на рис. 23 показано влияние на тепловой и гидравлический режим системы уменьшения в ней расхода воды, в табл. 21 — увеличения расхода.

Таблица 20

Изменение теплового и гидравлического режима системы при уменьшении в ней расхода воды

Коэфициент уменьшения расхода воды n	0,8			0,6		
Расчетная теплоотдача одного прибора, *ккал/час*	750	1000	1500	750	1000	1500
Расчетный расход воды, *кг/час* . .	30	40	60	30	40	60
Расход воды на втором этаже, *кг/час*	29	38	55	27	36	51
Расход воды на первом этаже, *кг/час*	19	26	41	9	12	21
Температура воды после прибора второго этажа, град.	69,3	69,0	68,1	67,8	67,7	66,2
Температура воды после прибора первого этажа, град.	57,8	58,6	60,2	12,3	27,6	34,9
Внутренняя температура второго этажа, град.	17,9	17,8	17,6	17,5	17,5	17,2
Внутренняя температура первого этажа, град.	15,4	15,5	15,9	5,7	9,0	10,5

Приведенные таблицы и рис. 23 показывают, что степень разрегулировки двухтрубной системы водяного отопления зависит от расчетного расхода воды в стояке; чем этот расход больше, тем размер разрегулировки системы меньше. Уменьшение расхода воды по сравнению с расчетным значительно больше разрегулировывает систему, чем увеличение расхода. При расчетной температуре наружного воздуха и соответственной температуре теплоносителя даже относительно небольшое уменьшение расхода воды приводит к существенному снижению внутренней температуры в первом этаже, в то время как температура второго этажа даже при большем снижении расхода воды в системе остается почти без изменений.

Таблица 21

Изменение теплового и гидравлического режима системы при увеличении в ней расхода воды

Коэфициент увеличения расхода воды, n	1,2			1,4		
Расчетная теплоотдача одного прибора, *ккал/час*	750	1000	1500	750	1000	1500
Расчетный расход воды, *кг/час*	30	40	60	30	40	60
Расход воды на втором этаже, *кг/час*	31	42,5	66	33	45,5	73
Расход воды на первом этаже, *кг/час*	41	53,5	78	51	66,5	95
Температура воды после прибора второго этажа, град	70,8	71,4	72,2	72,2	72,8	74,1
Температура воды после прибора первого этажа, град	75,4	75,8	75,4	79,7	79,3	78,7
Внутренняя температура второго этажа, град	18,2	18,4	18,5	18,5	18,6	18,9
Внутренняя температура первого этажа, град	19,2	19,2	19,1	20,2	20,0	19,8

Рассмотрение теплового и гидравлического режима двухтрубной системы водяного отопления (рис. 8) с переменными расходами воды производилось выше при расчетной температуре наружного воздуха, когда величина гравитационного напора наибольшая, а следовательно, и его влияние на распределение расходов воды по этажам наиболее значительно.

При повышении температуры наружного воздуха и соответственном снижении температуры теплоносителя гравитационный напор будет уменьшаться и, соответственно, будет падать его влияние на распределение расходов воды по этажам. Разрегулировка системы будет уменьшаться.

Пусть требуется определить размер разрегулировки стояка (рис. 8) при тех же изменениях расхода воды в нем, что и выше, но для иных температур теплоносителя и наружного воздуха.

Пусть $t'_н = t_н = +10°$, $t_в = 18°$

и, соответственно, $t_1 = t'_1 = 30{,}8°$ и $t_2 = 26{,}6°$.

По уравнению (34) и (37) в этом случае:

$$b = 21{,}4, \quad c = 8 \quad \text{и} \quad d = 4{,}2;$$

$$e = \frac{4{,}2 \times (-10{,}8)}{21{,}4 + 16} G = -1{,}21\, G,$$

$$f = \frac{4{,}2}{21{,}4 + 16} G = 0{,}11\, G.$$

Если в уравнении (52) подставить принятые выше параметры теплоносителя и найденные значения постоянных величин, то оно, отражая отрегулированность системы, т. е. равенство внутренних температур второго и первого этажей при температуре наружного воздуха +10°, будет иметь следующий вид:

$$8{,}61\, G^{-2} G_2'^2 + 8{,}34 \times 10^{-3} n G_0 G_2' - 2{,}09 \times 10^{-3} n^2 G_0^2 - 63{,}14 +$$

$$+ 2{,}2 \frac{30{,}8\, G_2' - 1{,}21\, G}{G_2' + 0{,}11\, G} - 0{,}15 \times \frac{15{,}4\, n G_0 - 30{,}8\, G_2' - 1{,}21\, G}{0{,}5\, n G_0 - G_2' + 0{,}11\, G} = 0.$$

Если принять, так же, как и в предыдущем случае, $G = 30$ *кг/час* и $G_0 = 120$ *кг/час*, то приведенное выше уравнение примет следующий вид:

$$0{,}01\, G_2'^2 + n G_2' - 30{,}1\, n^2 - 63{,}14 + 2{,}2 \frac{30{,}8\, G_2' - 36{,}3}{G_2' + 3{,}3} -$$

$$- 0{,}15 \times \frac{1848\, n - 30{,}8\, G_2' - 36{,}3}{60\, n - G_2' + 3{,}3} = 0.$$

Если $n = 0{,}8$ (уменьшение расхода воды на 20%), то:

$$G_2' = 27 \text{ кг/час} \quad \text{и} \quad G_1' = 11 \text{ кг/час};$$

$$t_{22}' = 26{,}2° \quad \text{и} \quad t_{21}' = 25{,}2°;$$

$$t_{в2}' = 17{,}9° \quad \text{и} \quad t_{в1}' = 17{,}7°.$$

При $n = 0{,}5$ (уменьшение расхода воды против расчетной нормы на 50%):

$$G_2' = 23{,}0 \text{ кг/час} \quad \text{и} \quad G_1' = 7{,}0 \text{ кг/час};$$

$$t_{22}' = 26{,}0° \quad \text{и} \quad t_{21}' = 14{,}2°;$$

$$t_{в2}' = 17{,}8° \quad \text{и} \quad t_{в1}' = 15{,}4°.$$

Рассмотрение полученного результата и сравнение его с ранее полученным для температуры наружного воздуха —30° показывает, что в данном случае разрегулировка системы при уменьшении расхода воды значительно меньше; так, при уменьшении расхода воды в системе в два раза, разность температур второго и первого этажей достигла всего 2,4°, в то время как в предыдущем случае (при $t_н = -30°$) она была больше 10°.

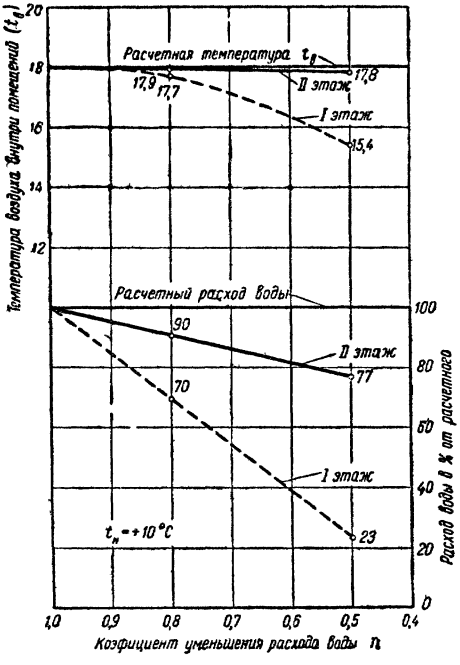


Рис. 24. Зависимость разрегулировки двухтрубной двухэтажной системы от уменьшения расхода воды в ней

Подобным методом определяются тепловой и гидравлический режим той же системы (рис. 8) для любой другой температуры наружного воздуха и при любом расчетном расходе воды нагревательными приборами. Результаты произведенных расчетов приведены на рис. 24.

Рис. 24 показывает, что даже значительное уменьшение расхода воды в рассматриваемой системе при высоких температурах наружного воздуха не повлекло за собой значительной ее разрегулировки.

Тепловой и гидравлический режим однотрубных систем может быть определен либо в отношении температуры воды, поступающей в нагревательный прибор для обеспечения соответствующего температурного режима, либо в отношении внутренней температуры помещения, которая может быть обеспечена соответствующим нагревом теплоносителя, решением основных уравнений теплового баланса. В обоих случаях решение этой системы уравнений приводит к квадратному уравнению.

При определении температуры теплоносителя получается следующее выражение, отнесенное к нагревательному прибору x:

$$t'_x = \frac{-B_x \pm \sqrt{B_x^2 - 4A_x C_x}}{2A_x}, \qquad (35)$$

где:

$$A_x = 0{,}08c_x;$$

$$B_x = \left(9{,}2c_x - \frac{0{,}08d_x}{n}\, t'_{вх} + \frac{0{,}08d_x}{n}\, t'_н - 0{,}16c_x t'_{вх}\right)$$

$$C_x = \left(\frac{4{,}6d_x}{n}\, t'_н - \frac{4{,}6d_x}{n}\, t'_{вх} - 9{,}2c_x t'_{вх} + \frac{0{,}02d_x^2}{c_x n^2}\, t'^2_{вх} - \frac{0{,}04d_x^2}{c_x n^2}\, t'_н t'_{вх} + \right.$$
$$+ \frac{0{,}08d_x}{n}\, t'^2_{вх} + \frac{0{,}02d_x^2}{c_x n^2}\, t'^2_н - \frac{0{,}08d_x}{n}\, t'_н t'_{вх} + 0{,}08c_x t'^2_{вх} -$$
$$- b_x t'_{вх} + b_x t'_н$$

и, соответственно:

$$b_x = [4{,}6 + 0{,}02\,(t_x + t_{x+1} - 2t_{вх})]\,(t_x + t_{x+1} - 2t_{вх}), \quad (54)$$
$$c_x = (t_{вх} - t_н),$$
$$d_x = (t_x - t_{x+1}).$$

Внутренняя температура помещения, отапливаемого этим нагревательным прибором, будет определяться следующим образом:

$$t'_{вх} = \frac{-B'_x \pm \sqrt{B'^2_x - 4A'_x C_x}}{2A'_x}; \quad (55)$$

здесь:

$$A'_x = \frac{0{,}02d_x^2}{c_x n^2} + \frac{0{,}08d_x}{n} + 0{,}08c_x;$$

$$B'_x = -\left[\frac{4{,}6d_x}{c_x n} + 9{,}2c_x + \frac{0{,}08}{n}\, t'_x + \frac{0{,}04d_x^2}{c_x n^2}\, t'_н + \frac{0{,}08d_x}{n}\, t'_н + \right.$$
$$\left. + 0{,}16c_x t'_x + b_x\right];$$

$$C'_x = 9{,}2c_x t'_x + \frac{4{,}6d_x}{n}\, t'_н + \frac{0{,}08d_x}{n}\, t'_x t'_н + 0{,}08c_x t'^2_x + \frac{0{,}02d_x^2}{c_x n^2}\, t'^2_н +$$
$$+ b_x t'_н.$$

Полученные уравнения могут быть использованы и для анализа влияния на внутренние температуры несоблюдения в системе расчетных расходов воды.

Пусть требуется определить влияние изменения расхода воды на внутреннюю температуру в однотрубной двухэтажной системе с двумя последовательно включенными приборами.

Пусть расчетные параметры системы будут следующими: $t_1 = 95°$, $t_к = 70°$, $t_{в1} = t_{в2} = 18°$, $t_н = t'_н = -30°$.

Если $G'_1 = nG$, то: $b_1 = 1051$, $b_2 = 807$, $c_1 = c_2 = 48$ и $d_1 = d_2 = 12{,}5$.

В этом случае на основании уравнения (55) величины A_1', B_1' и C_1' для первого нагревательного прибора будут иметь следующее значение:

$$A_1' = 0{,}065n^{-2} + n^{-1} + 3{,}84;$$

$$B_1' = -\left[2222 + 0{,}5n^{-1}\left(245 - 7{,}8n^{-1}\right)\right];$$

$$C_1' = 7{,}5n^{-1}\left(610 + 7{,}8n^{-1}\right) + 45\,078.$$

При $n = 0{,}8$ (уменьшение расхода воды по сравнению с расчетным на 20%):

$$A_1' = 5{,}19, \quad B_1' = -2369 \text{ и } C_1' = 39\,453.$$

Тогда

$$t_{в1}' = \frac{2369 \pm \sqrt{2369^2 - 4 \times 5{,}19 \times 39\,453}}{2 \cdot 5{,}19} = 17{,}7°.$$

Получилось понижение внутренней температуры на 0,3°.

При $n = 0{,}5$:

$$A_1' = 6{,}10, \quad B_1' = -2451 \text{ и } C_1' = 36\,162$$

и, соответственно:

$$t_{в1}' = \frac{2451 \pm \sqrt{2451^2 - 4 \times 6{,}10 \times 36\,162}}{2 \times 6{,}10} = 15{,}3°,$$

т. е. снижение внутренней температуры составило 2,7°.

Для определения размеров снижения внутренней температуры помещения, обогреваемого вторым прибором, необходимо знать температуру воды, поступающей в этот прибор, или, что одно и то же, температуру воды, выходящей из первого прибора.

$$t_2' = 95 - \frac{12{,}5 \times 47{,}7}{48 \times 0{,}8} = 79{,}5°.$$

В этом случае:

$$A_2' = 0{,}065n^{-2} + n^{-1} + 3{,}84;$$

$$B_2' = -\left[1859 + 0{,}5n^{-1}\left(214 - 7{,}8n^{-1}\right)\right];$$

$$C_2' = -7{,}5n^{-1}\left(548 - 7{,}8n^{-1}\right) + 35\,170.$$

При $n = 0{,}8$:

$$A_2' = 5{,}19, \quad B_2' = -1987 \text{ и } C_2' = 30\,130,$$

откуда

$$t'_{в2} = \frac{1987 \pm \sqrt{1987^2 - 4 \times 5{,}19 \times 30\,130}}{2 \times 5{,}19} = 15{,}6°.$$

Понижение внутренней температуры против нормы на 2,4°.
При $n = 0{,}5$:

$$t'_2 = 95 - \frac{12{,}5 \times 45{,}3}{48 \times 0{,}5} = 71{,}4°;$$

$$A'_2 = 6{,}10, \quad B'_2 = -1979 \text{ и } C'_2 = 19\,210,$$

откуда

$$t'_{в2} = \frac{1979 \pm \sqrt{1979^2 - 4 \times 6{,}10 \times 19\,210}}{2 \times 6{,}10} = 10{,}3°.$$

Понижение внутренней температуры против нормы достигло 7,7° и на 5° больше по сравнению с внутренней температурой помещения, обогреваемого первым прибором. По полученным значениям внутренних температур нетрудно определить и изменения расхода тепла, показанные в табл. 22.

Таблица 22

Показатели	Порядковые номера отопительных приборов			
	I		II	
	Внутренняя температура, град.	Уменьшение расхода тепла	Внутренняя температура, град.	Уменьшение расхода тепла
При уменьшении расхода воды на 20% . .	17,7	0,6%	15,6	5,0%
При уменьшении расхода воды на 50% . .	15,3	5,6%	10,8	16%

Сравнение табл. 22 с результатами, полученными для двухтрубной системы водяного отопления, показывает, что распределение температур и расходов тепла между первым и вторым приборами не зависит от расхода воды в системе, как это было в двухтрубной системе.

Уменьшение расхода воды в однотрубной системе на 20% изменило внутренние температуры почти в той же степени, что в двухтрубной системе, при уменьшении расхода воды на 50% против нормы, понижение внутренних температур и их расхождение по этажам в однотрубной системе оказалось менее интенсивным, чем в двухтрубной системе при малых расходах воды в ней и более интенсивным при больших расходах.

Размер разрегулировки однотрубной системы в зависимости от изменений в ней расходов воды показан на рис. 25.

В дополнение проведенного анализа влияния на тепловой режим однотрубной системы изменений в ней расходов воды при двух этажах (или при двух последовательно включенных нагревательных приборах), необходимо выяснить, как изменяется это влияние при большом количестве последовательно включенных приборов.

Пусть количество приборов $m = 10$.

Тепловой режим и в этом случае определяется основной системой уравнений, однако значения постоянных коэфициен-

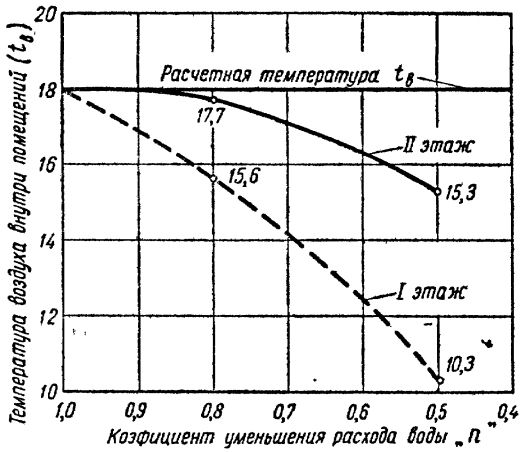


Рис. 25. Зависимость разрегулировки однотрубной двухэтажной системы от уменьшения расхода воды в ней

тов в этих уравнениях будут другими. Так как в данном случае наибольший интерес представляет тепловой режим первого и последнего приборов, то для упрощения исследования все промежуточные восемь приборов целесообразно рассматривать как один, равный по теплоотдаче восьми.

Значения постоянных коэфициентов по уравнению (54) будут в этом случае следующими:

$$b_1 = (4{,}6 + 0{,}02 \times 151{,}5) \times 151{,}5 = 1156,$$
$$b_2 = (4{,}6 + 0{,}02 \times 129) \times 129 = 923,$$
$$b_3 = (4{,}6 + 0{,}02 \times 107) \times 107 = 720;$$
$$c_1 = c_2 = c_3 = 48 \text{ и } d_1 = d_3 = 2{,}5 \text{ и } d_2 = 20.$$

Тогда:

$$A_1' = A_3' = 0{,}0026n^{-2} + 0{,}2n^{-1} + 3{,}84,$$
$$A_2' = 0{,}167n^{-2} + 0{,}2n^{-1} + 3{,}84,$$

$$B_1' = -\left[1597{,}6 + 7{,}68t_1' + 0{,}1n^{-1}\left(55 + 2t_1' - 1{,}56n^{-1}\right)\right],$$

$$B_2' = -\left[1364{,}6 + 7{,}68t_2' + 0{,}8n^{-1}\left(55 + 2t_2' - 12{,}5n^{-1}\right)\right],$$

$$B_3' = -\left[1161{,}6 + 7{,}68t_3' + 0{,}1n^{-1}\left(55 + 2t_3' - 1{,}56n^{-1}\right)\right]$$

и, соответственно:

$$C_1' = -1{,}5n^{-1}\left(230 + 4t_1' - 1{,}56n^{-1}\right) + 3{,}84t_1'\left(115 + t_1'\right) - 34\,680,$$

$$C_2' = -12n^{-1}\left(230 + 4t_2' - 12{,}5n^{-1}\right) + 3{,}84t_2'\left(115 + t_2'\right) - 27\,690,$$

$$C_3' = -1{,}5n^{-1}\left(230 + 4t_3' - 1{,}56n^{-1}\right) + 3{,}84t_3'\left(115 + t_3'\right) - 21\,600.$$

При $n = 0{,}8$ (сокращение расхода воды против нормы на 20%)

$$A_1' = A_3' = 4{,}1, \quad A_2' = 4{,}35, \quad B_1' = -2357{,}6 \text{ и } C_1' = 40\,785.$$

Внутренняя температура помещения, обогреваемого первым прибором:

$$t_{в1}' = \frac{2357{,}6 \pm \sqrt{2357{,}6^2 - 4 \times 4{,}1 \times 40\,785}}{2 \times 4{,}1} = 17{,}7°.$$

Следовательно, и в этом случае (при десяти последовательно включенных приборах) снижение внутренней температуры оказалось равным 0,3°, т. е. в точности таким же, каким оно было и при последовательном включении только двух приборов.

Температура воды после первого прибора:

$$t_2' = 95 - \frac{2{,}5 \times 47{,}7}{48 \times 0{,}8} = 91{,}9°.$$

Здесь имеется снижение температуры против нормы на 0,6°, в то время как в предыдущем случае оно составило 3,0°.

Определение усредненной внутренней температуры помещений с промежуточными приборами по уравнению (55) дает:

$$A_2' = 4{,}35, \quad B_2' = 2293{,}5, \quad C_2' = 36\,630,$$

откуда

$$t_{в2}' = \frac{2293{,}5 \pm \sqrt{2293{,}5^2 - 4 \times 4{,}35 \times 36\,630}}{2 \times 4{,}35} = 16{,}5°.$$

Здесь имеется снижение внутренней температуры на 1,5°.

В этом случае температура воды, поступающей в последний прибор:

$$t_3' = 91{,}9 - \frac{20 \times 46{,}5}{48 \times 0{,}8} = 67{,}7°.$$

Тогда

$$A'_3 = 4{,}1, \quad B'_3 = -1705 \text{ и } C'_3 = 24\,956,$$

откуда

$$t'_{s3} = \frac{1705 \pm \sqrt{1705^2 - 4 \times 4{,}1 \times 24\,956}}{2 \times 4{,}1} = 15{,}3°.$$

Снижение внутренней температуры помещения, обогреваемого последним прибором, составило 2,7°, т. е. получилось почти таким же, как при двух последовательно включенных приборах. Полученный результат позволяет сделать вывод, что это снижение не зависит от числа последовательно включенных приборов и является лишь функцией уменьшения расхода воды.

Приведенные расчеты показывают степень разрегулировки однотрубной системы при отклонении в ней расхода воды от расчетного при температуре наружного воздуха —30°. Очевидно, что при более высоких температурах наружного воздуха и соответственно при более низких температурах теплоносителя размер разрегулировки будет сокращаться и в однотрубной системе.

Если в двухтрубной системе размер разрегулировки зависит от заданного расхода воды в стояке (определяющего его удельное гидравлическое сопротивление), то в однотрубной системе размер разрегулировки от расчетного расхода воды не зависит. Следовательно, в двухтрубной системе, путем повышения гидравлического сопротивления трубопроводов, можно значительно повысить гидравлическую, а следовательно, и тепловую устойчивость ее. При однотрубной системе такой возможности не имеется, что является существенным недостатком этой системы. Однотрубные системы, имея во многих отношениях значительно лучшие показатели по сравнению с двухтрубными, весьма чувствительны к отклонениям в них расходов воды от требуемых по расчету.

Уменьшение расхода воды в однотрубных системах по сравнению с требуемым по расчету ведет к отставанию хвостовых приборов, а увеличение — к их перегреву. Этот органический недостаток может быть устранен при особом методе проектирования однотрубных горизонтально-поэтажных систем.

3. Гравитационная разрегулировка

Переменное влияние гравитационного напора в двухтрубных системах водяного отопления не дает возможности сохранить в течение отопительного сезона равную теплоотдачу нагревательных приборов, расположенных в разных этажах, даже при наличии в системе идеальной отрегулировки.

Степень разрегулировки системы находится в прямой зависимости от того, при какой температуре наружного воздуха и, соответственно, при какой температуре теплоносителя была произведена отрегулировка системы.

Тепловой и гидравлический режимы стояка двухтрубной системы, изображенной на рис. 8, определяется системой уравнений (30) — (33), которая дает возможность определить указанные режимы для любых температур теплоносителя и наружного воздуха при различных условиях отрегулировки системы.

Если предположить, что схема рис. 8 рассчитана на температурный перепад в 25° (95 и 70°) и отрегулирована в начале отопительного сезона при $t_н = +10°$, то в упомянутой выше системе уравнений

$t_н = +10°$, $t_1 = 31°$, $t_2 = 27°$, $t_{в1} = t_{в2} = t_в = 18°$ и $n = 1{,}0$ (постоянный расход воды).

В этом случае значения постоянных величин в уравнениях (36) и (37) будут следующими:

$$b = 22, \quad c = 8 \text{ и } d = 4,$$

$$e = \frac{4(2t'_н - t'_1)}{38} G \text{ и } f = \frac{4}{38} G$$

и уравнение (52) принимает в этом случае следующий вид:

$$8{,}2G^{-2}\left(0{,}5G_0 - G'_1\right)^2 + 4{,}17 \times 10^{-3} G_0 \left(0{,}5G_0 - 2G'_1\right) - 2{,}05t'_1 + \\ + 2{,}2\frac{t'_1\left(0{,}5G_0 - G'_1\right) + e}{0{,}5G_0 - G'_1 + f} - 0{,}15\frac{t'_1 G'_1 + e}{G'_1 + f} = 0. \qquad (56)$$

Если принять теперь, что $t'_н = -30°$ и, соответственно, $t'_1 = 95°$, расход воды в одном нагревательном приборе $G = 40$ *кг/час* и общий расход воды в стояке $G_0 = 160$ *кг/час*, то в этом случае:

$$e = -655 \text{ и } f = 4{,}2.$$

По уравнению (56)

$$5{,}1 \times 10^{-3} G'^2_1 - 2{,}15 G'_1 - 98{,}6 + 2{,}2\frac{6945 - 95G'_1}{84{,}2 - G'_1} - \\ - 0{,}15 \times \frac{95G'_1 - 655}{G'_1 + 4{,}2} = 0.$$

Решением полученного уравнения определяется:

$$G'_1 = 29 \text{ } кг/час \text{ и } G'_2 = 51 \text{ } кг/час.$$

По найденным расходам воды на основании уравнений (36) и (37) определяются температуры воды после приборов и внутренние температуры помещений второго и первого этажей:

$$t'_{22} = \frac{95 \times 51 - 655}{51 + 4{,}2} = 76{,}0°,$$

$$t'_{21} = \frac{95 \times 29 - 655}{29 + 4{,}2} = 63{,}4°$$

и

$$t'_{в2} = \frac{8 \times 95 + 8 \times 76 - 22 \times 30}{22 + 16} = 18{,}6°,$$

$$t'_{в1} = \frac{8 \times 95 + 8 \times 63{,}4 - 22 \times 30}{22 + 16} = 16{,}0°.$$

Следовательно, несмотря на то, что в начале отопительного сезона при $t_н = +10°$ внутренняя температура обоих этажей была в точности одинаковой, при понижении температуры наружного воздуха и соответственном повышении температуры теплоносителя это равенство оказалось нарушенным. В верхнем, втором этаже, вследствие повышения величины гравитационного напора, внутренняя температура повысилась против нормы относительно немного, всего на 0,6°, в то время как внутренняя температура в первом этаже снизилась против нормы на 2°.

Подобными же расчетами определятся тепловой и гидравлический режимы системы и для любой промежуточной температуры наружного воздуха и соответствующей ей температуры теплоносителя для любого расхода воды в стояке.

Как видно из рис. 26, размер последующей разрегулировки системы не остается постоянным, находясь в зависимости от расчетных расходов воды в приборах. Чем больше расход воды в стояке, тем меньше разрегулировка — система получается в тепловом и гидравлическом отношении более устойчивой. Отсюда следует сделать вывод о необходимости избегать проектирования систем с малонагруженными стояками.

На рис. 26 показаны также размеры разрегулировки системы при условии отрегулировки ее в одном случае при средней температуре отопительного периода —5° и в другом случае при расчетной температуре наружного воздуха —30°.

Как видно из графика на рис. 26, размер последующей разрегулировки системы в обоих случаях получается меньше, чем в ранее рассмотренных. Если система отрегулирована при расчетной наружной температуре, то при промежуточных температурах наружного воздуха повышение температуры по срав-

нению с нормальной происходит в первом этаже, а понижение — во втором. При дальнейшем повышении наружной температуры и соответствующем понижении температуры теплоносителя внутренние температуры обоих этажей снова сближаются, что объясняется уменьшением температурных перепадов и прибли-

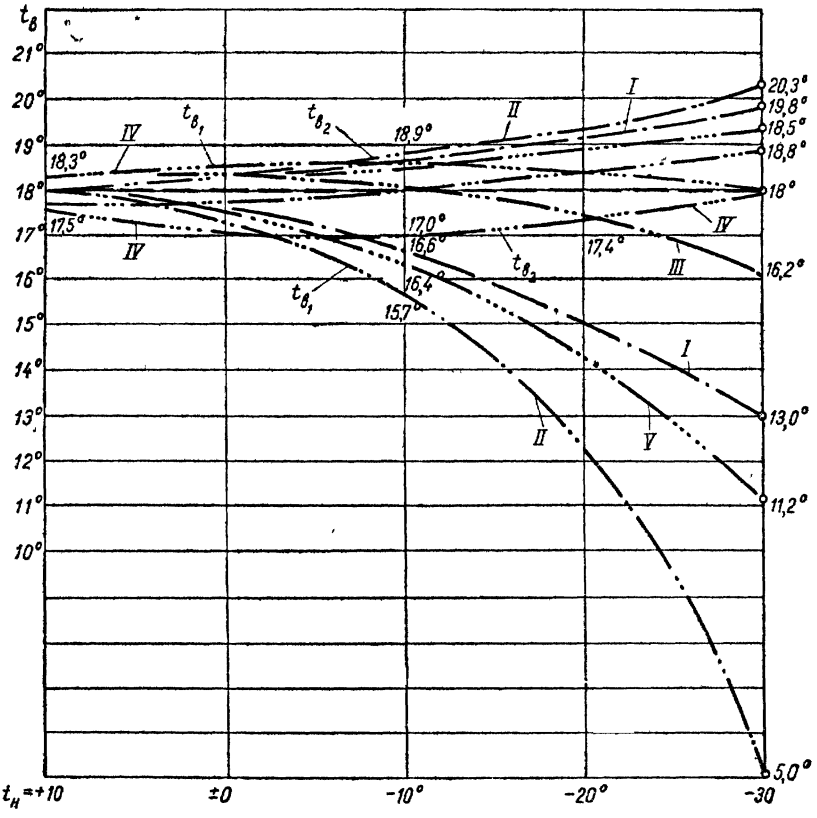


Рис. 26. Гравитационная разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой

жением температур теплоносителя к температуре помещения (+18°).

Из рис. 26 видно, что самой невыгодной оказывается отрегулировка двухтрубной системы в начале отопительного сезона, поскольку она не гарантирует в дальнейшем равномерного прогрева системы. Регулировать систему при низких температурах наружного воздуха также не представляется удобным, а потому следует рекомендовать производство отрегулировки при пониженных расходах воды (в пределах 50—60% от расчетного) и, соответственно, при несколько повышенных темпе-

ратурах воды, т. е. переходить на переменный расход воды в системе, который только и может гарантировать равномерность прогрева ее в течение всего отопительного сезона. Анализ этого режима не входит в задачу настоящей работы, поскольку он изложен отдельно.[1]

V. ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

1. Попутное движение воды

Выше было установлено, что неравномерность прогрева двухтрубных систем водяного отопления вызывается в основном их вертикальной и горизонтальной разрегулировкой.

Для обеспечения равномерного прогрева в двухтрубных системах водяного отопления они во многих случаях проектируются с попутным движением воды.

Проектирование системы водяного отопления по принципу попутного движения воды, введенной впервые русским теплотехником профессором В. М. Чаплиным, имеет целью получить в отопительной системе все расчетные кольца примерно одной и той же протяженности, что обеспечивает всем стоякам почти одинаковые удельные потери напора и сокращает возможность образования остаточных напоров, приводящих к горизонтальной разрегулировке системы.

Горизонтальная разрегулировка систем, как это было показано ранее, приводит к уменьшению расхода воды в крайних стояках, соответственному общему снижению средней температуры нагревательных приборов по всему стояку в целом и, следовательно, к общему снижению внутренней температуры помещений, отапливаемых стояком. Уменьшение расхода воды в крайних стояках увеличивает, кроме того, вертикальную разрегулировку этих стояков по этажам и приводит к более интенсивному отставанию внутренних температур нижних этажей.

При проектировании систем с попутным движением воды остаточные напоры в отдельных стояках получаются обычно незначительными; расходы воды по всем стоякам близки к расчетным и в крайних стояках усиление вертикальной разрегулировки или охлаждения воды в трубах отсутствует или незначительно. Вертикальная разрегулировка системы, обусловливаемая наличием остаточных напоров в стояках, будет, естественно, иметь место и в системах с попутным движением воды.

Влияние снижения расхода воды и уменьшения температуры

[1] В. К. Дюскин. Переменный расход воды в тепловых сетях (количественно-качественное регулирование). Энергоиздат, 1949 г.

теплоносителя на внутреннюю температуру помещения достаточно подробно рассмотрено ранее.

К уменьшению расхода воды и к понижению температуры теплоносителя отопительные системы весьма чувствительны, причем эта чувствительность уменьшается с повышением температуры наружного воздуха и увеличивается с ее понижением.

Из рассмотренного ранее ясно, что применение в двухтрубных системах водяного отопления попутного движения воды улучшает регулировку и работу системы. Благодаря этому такие системы получили широкое распространение. Однако эффективность и необходимость применения в системах попутного движения воды далеко не во всех случаях одинакова. Выше, при исследовании горизонтальной разрегулировки (в особенности в системах с верхней разводкой), было установлено, что ее размеры зависят от величин остаточных напоров в стояках и от количества стояков в системе.

Рис. 21 показывает, например, что наличие во всех стояках двухтрубной системы с верхней разводкой остаточных напоров в размере 20% уменьшает расход воды в крайнем стояке системы с 8 стояками (два стояка на каждую сторону) всего на 6%, в системе с 16 стояками — на 8% и в системе с 24 стояками — на 11%. Наличие в системах остаточных напоров в размере 50% уменьшило расход воды в крайнем стояке в первом случае на 17%, во втором стояке на 27% и в третьем — на 33%. Все указанные цифры даны без учета изменения гравитационного напора, увеличивающегося при уменьшении расхода воды и тем самым уменьшающего горизонтальную разрегулировку.

Влияние горизонтальной разрегулировки в системах с попутным движением воды может быть определено для двухэтажной системы следующей системой уравнений:

$$2G_1 + 2G_2 = nG_{ст},$$

$$0{,}5KF_2(t_1 + t_{22} - 2t_{в2}) = K_0F_0(t_{в2} - t_н) = G_2(t_1 - t_{22}),$$

$$0{,}5KF_1(t_1 + t_{21} - 2t_{в1}) = K_0F_0(t_{в1} - t_н) = G_1(t_1 - t_{21}),$$

$$S'_{ст}\left(G_2^2 - G_1^2\right) = 0{,}6h_2\left(t_1 - t_{22}\right) - 0{,}6h_1\left(t_1 - t_{21}\right),$$

где: n — коэфициент уменьшения расхода воды в стояке от горизонтальной разрегулировки;

$S'_{ст}$ — приведенная характеристика гидравлического сопротивления стояка.

Исследование полученной системы уравнений в общем виде затрудняется наличием степенной функции неизвестных. Целесообразнее поэтому исследовать ее на конкретных схемах.

Такое исследование сводится к анализу влияния на тепловой режим системы уменьшения расхода воды в стояке, что уже было рассмотрено ранее достаточно подробно.

Влияние уменьшения расхода воды в стояке на распределение температур по этажам неодинаково; оно тем больше, чем меньше в стояках расчетный расход воды и, следовательно, чем больше в них величина остаточного напора. В одном случае (рис. 9) уменьшение расхода воды в стояке на 25% дает дополнительное снижение температуры в первом этаже на 4,9°, во втором случае примерно на 3°, и в третьем случае — всего на ~ 1°. График показывает, что снижение расхода воды оказывает наименьшее влияние на понижение внутренней температуры в том случае, когда стояки имеют большую нагрузку, т. е. когда расчетные удельные потери напора в них сравнительно велики.

Определение размеров горизонтальной разрегулировки в многоэтажной и многостояковой системе (рис. 7) было исследовано в третьем разделе.

Интересно определить, как отразится получившаяся в данной системе горизонтальная разрегулировка, т. е. перераспределение расходов воды по стоякам, на вертикальной разрегулировке этих стояков.

Для решения этого вопроса необходимо, как и ранее, решить систему уравнений (40), подставляя в них найденные ранее значения характеристик гидравлического сопротивления и учитывая, что величина суммарного расхода воды в стояке под влиянием горизонтальной разрегулировки уменьшилась с 416 *кг/час* до 346 *кг/час*.

Система уравнений (40) будет в этом случае иметь следующий вид:

$$8{,}34 \times 10^{-3} G_6^2 - 0{,}37 \times 10^{-3} (346 - 2G_6)^2 -$$

$$- 1{,}3 \times 10^{-3} G_5^2 = \frac{2000}{G_6},$$

$$1{,}3 \times 10^{-3} G_5^2 + 7{,}04 \times 10^{-3} (G_6 + G_5)^2 - 0{,}37 \times$$

$$\times 10^{-3} (346 - 2G_6 - 2G_5)^2 - 1{,}3 \times 10^{-3} G_4^2 = \frac{3600}{G_6 + G_5},$$

$$1{,}3 \times 10^{-3} G_4^2 + 7{,}04 \times 10^{-3} (G_6 + G_5 + G_4)^2 - 0{,}37 \times 10^{-3} (346 -$$

$$- 2G_6 - 2G_5 - 2G_4)^2 - 1{,}3 \times 10^{-3} G_3^2 = \frac{5200}{G_6 + G_5 + G_4},$$

$$1{,}3 \times 10^{-3} G_3^2 + 1{,}48 \times 10^{-3} (G_6 + G_5 + G_4 + G_3)^2 - 1{,}76 \times$$

$$\times 10^{-3} (346 - 2G_6 - 2G_5 - 2G_4 - 2G_3)^2 -$$

$$- 1{,}3 \times 10^{-3} G_2^2 = \frac{6800}{G_6 + G_5 + G_4 + G_3},$$

$$1{,}3 \times 10^{-3} G_2^2 + 1{,}48 \times 10^{-3} (G_6 + G_5 + G_4 + G_3 + G_2)^2 -$$

$$- 8{,}34 \times 10^{-3} G_1^2 = \frac{8400}{G_6 + G_5 + G_4 + G_3 + G_2},$$

$$G_6 + G_5 + G_4 + G_3 + G_2 + G_1 = 346.$$

Последовательное решение всех приведенных уравнений дает расходы воды по этажам, указанные в табл. 23.

Таблица 23

Расход воды, *кг/час*	Этаж					
	VI	V	IV	III	II	I
По норме	40	32	32	32	32	40
По расчету	72	15	11	64	11	0

В итоге, следовательно, получилось, что расход воды в первом этаже оказался равным нулю.

Системой приведенных выше уравнений учитывалось изменение гравитационного напора под влиянием перераспределения расходов воды по этажам, но не учитывалось его изменение под влиянием охлаждения воды в трубах.

В результате полученных выше резких изменений расходов воды по этажам создадутся большие гравитационные напоры (не только в обратных, но и в падающих трубах), которые будут препятствовать столь резкому перераспределению расходов воды по этажам.

Если учесть дополнительные циркуляционные напоры в обратных и в подающих трубах, то распределение расходов воды окажется уже иным (см. табл. 24).

Таблица 24

Расход воды, *кг/час*	Этаж					
	VI	V	IV	III	II	I
По норме	40	32	32	32	32	40
По расчету	70	15	12	50	10	16

Из сопоставления таблиц видно, что учет охлаждения воды в трубах внес существенные коррективы в расходы воды третьего и первого этажей, в частности расход воды на первом этаже не только не оказался равным нулю, но получился даже больше расхода воды на втором этаже.

Для проверки правильности полученного распределения расходов воды по этажам, а также теплового и гидравлического режима в стояке (поскольку выше был применен приближенный способ решения уравнений) необходимо провести полный гидравлический и тепловой расчёт рассматриваемого стояка.

Расчет начинается с определения степени охлаждения воды в подающих трубах, для чего предварительно необходимо задаться внутренними температурами помещений по этажам, сообразуясь с данными табл. 6 к рис. 7; предположительно можно принять, что $t'_{в6}=20°$, $t'_{в5}=13°$, $t'_{в4}=11°$, $t'_{в3}=19°$, $t'_{в2}=8°$ и $t'_{в1}=9°$.

По принятым температурам и расходам воды можно определить степень охлаждения воды в подающих трубах каждого этажа (начальная температура у прибора шестого этажа берется без изменения равной 94°): $\Delta t_5=1{,}4°$, $\Delta t_4=1{,}6°$, $\Delta t_3=1{,}7°$, $\Delta t_2=4{,}3°$, $\Delta t_1=6{,}5°$.

Здесь для второго и первого этажей введена поправка на среднюю температуру, поскольку охлаждение в этих этажах весьма значительно.

Суммарное охлаждение воды в стояке оказывается в этом случае равным:

$$\Sigma\Delta t=1{,}0+1{,}4+1{,}6+1{,}7+4{,}3+6{,}5=16{,}5°.$$

Вследствие уменьшения расхода воды в стояке и происшедшей в нем вертикальной разрегулировки интенсивность охлаждения воды в трубах по сравнению с расчетным охлаждением повысилась более чем в два раза (16,5° вместо 8,1°). Совершенно очевидно, что такое понижение температуры теплоносителя должно вызвать и значительное понижение внутренней температуры.

С учетом найденного охлаждения воды в трубах начальная температура ее в приборах по этажам от шестого к первому составит: $t'_{16}=94{,}0°$, $t'_{15}=92{,}6°$, $t'_{14}=91{,}0°$, $t'_{13}=89{,}3°$, $t'_{12}=85{,}0°$ и $t'_{11}=78{,}5°$.

Температура обратной воды после прибора определится для данных условий расчета равенством:

$$t'_2=\frac{[G'(t_1+t_2+60)-25G]\,t'_1-1500\,G}{25\,G+(t_1+t_2+60)\,G'}$$

и, соответственно, внутренняя температура помещения

$$t'_в = \frac{G'(t'_1 - t'_2)(t_в - t_н)}{G(t_1 - t_2)} + t_н.$$

Так как оба приведенных равенства служат для определения влияния на тепловой режим вертикальной разрегулировки, то за начальную температуру воды в приборе следует считать расчетную температуру, учитывающую охлаждение воды в трубах. Для рис. 7 это будут: $t_{16} = 94{,}0°$, $t_{15} = 93{,}2°$, $t_{14} = 92{,}2°$, $t_{13} = 90{,}8°$, $t_{12} = 89{,}4°$ и $t_{11} = 86{,}9°$.

В табл. 25 приведены полученные значения внутренних температур и температур обратной воды.

Таблица 25

Температура, град.	Этаж					
	VI	V	IV	III	II	I
Обратной воды	79,1	45,0	34,6	72,8	22,3	28,6
Внутренняя температура помещения	20,0	12,8	10,6	19,5	7,6	8 5
Внутренняя температура, принятая предположительно . .	20,0	13,0	11,0	19,0	8,0	9,0
Величина ошибки	0,0	—0,2	—0,4	+0,5	—0,4	—0,5

Табл. 25 показывает, что принятые выше предположительно внутренние температуры помещений достаточно близко совпадают с полученными по расчету.

Наибольшее расхождение составляет всего 0,5°, а по отношению к расчетной разности температур 0,7%; следовательно, полученные выше результаты можно принять как окончательные.

По найденным выше температурам обратной воды на выходе ее из приборов и по принятым расходам ее можно определить охлаждение воды в обратных трубах.

Температура обратной воды после прибора шестого этажа $t'_{26} = 79{,}1°$, температура помещения в пятом этаже $t'_{в5} = 12{,}8°$; следовательно, охлаждение воды в обратном стояке будет следующим:

$$\Delta t''_5 = 12 \times 0{,}067 \times 3{,}4\,(79{,}1 - 12{,}8) \times 140^{-1} = 1{,}3°.$$

Конечная температура в обратном стояке пятого этажа будет следующей:

$$t''_к = 79{,}1 - 1{,}3 = 77{,}8°.$$

Средняя температура стояка будет равной:

$$t''_5 = 79{,}1 - 0{,}5 \times 1{,}3 = 78{,}5°.$$

Начальная температура в обратном стояке четвертого этажа составит:

$$t''_{н4} = \frac{77{,}8 \times 140 + 45 \times 30}{170} = 72{,}0°.$$

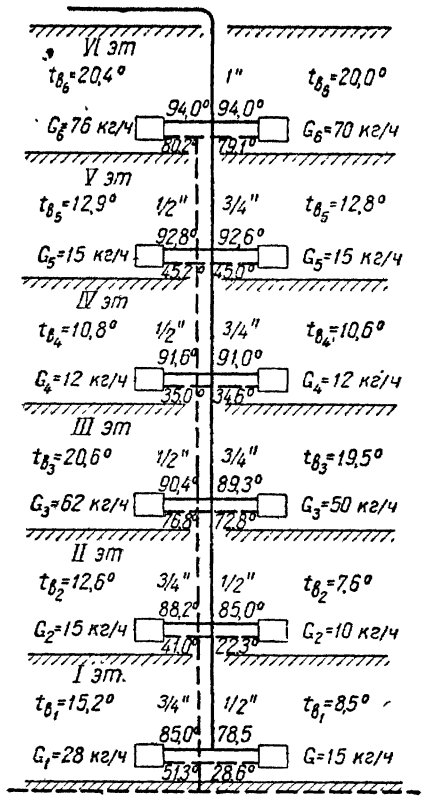


Рис. 27. Тепловой и гидравлический режим крайнего стояка схемы рис. 7. Левая сторона схемы — при действии одной вертикальной разрегулировки, правая — при совместном действии вертикальной и горизонтальной разрегулировок.

Аналогично можно получить:

$$\Delta t''_4 = 1{,}0°, \quad t''_{к4} = 71{,}0°,$$
$$t''_4 = 71{,}5°.$$

III этаж

$$t''_{н3} = 66{,}5°, \quad \Delta t''_3 = 0{,}6°,$$
$$t''_{к3} = 65{,}9°, \quad t''_3 = 66{,}2°.$$

II этаж

$$t''_{н2} = 68{,}3°, \quad \Delta t''_2 = 0{,}7°,$$
$$t''_{к2} = 67{,}6°, \quad t''_2 = 68{,}0°.$$

I этаж

$$t''_{н1} = 64{,}9°, \quad \Delta t''_1 = 0{,}6°,$$
$$t''_{к1} = 64{,}3°, \quad t''_1 = 64{,}6°,$$
$$t''_2 = 61{,}0°.$$

Основные полученные температуры приведены (правая сторона) на рис. 27.

Суммарный перепад температур в стояке при уменьшенном расходе воды получился равным:

$$\Delta t_{ст} = 94 - 61{,}0 = 33{,}0°.$$

Найденные температуры дают возможность определить разность действующих в каждом этаже гравитационных напоров по уравнению:

$$\Delta H_x = 0{,}6h_{cm}\left(t_1 - t''_{cm}\right) + 0{,}6h_n\left(t_1 - t_x\right) - 0{,}6h_{cm}\left(t_1 - t'_{cm}\right) -$$
$$- 0{,}6h_n\left(t_1 - t_{x-1}\right) = 0{,}6h_{cm}\left(-t''_{cm} + t'_{cm}\right) + 0{,}6h_n\left(-t_x + t_{x-1}\right),$$

где: h_{cm} — циркуляционная высота стояка от крестовины до крестовины;

h_n — циркуляционная высота прибора от середины прибора до крестовины;

t'_{cm} — температура воды в подающем стояке;

t''_{cm} — температура воды в обратном стояке;

t_x — температура воды, поступающей в прибор какого-либо этажа.

Решение приведенного уравнения определит разность гравитационных напоров для всех этажей (как разность сопротивлений обратных и подающих труб).

$$\Delta H_5 = 0{,}15 \times (-79{,}1 + 45{,}0) + 2{,}04 \times (-78{,}5 + 93{,}3) =$$
$$= 25{,}1 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст.$$

Разность сопротивлений трубопроводов пятого этажа:

$$\Delta R_5 = 8{,}34 \times 10^{-3} \times 70^2 - 0{,}37 \times 10^{-3} \times 206^2 - 1{,}3 \times 10^{-3} \times$$
$$\times 15^2 - 24{,}9 \text{ } мм \text{ } вод. \text{ } ст$$

Расхождение

$\Delta H_5 - \Delta \Sigma (Rl + Z)_5 = 25{,}1 - 24{,}9 = 0{,}2$ *мм*, или 0,8%.

IV этаж

$\Delta H_4 = 39{,}8$ *мм вод. ст.*,

$\Delta \Sigma (Rl + Z)_4 = 39{,}4$ *мм вод. ст.*

Расхождение равно 0,4 *мм*, или 1%.

III этаж

$\Delta H_3 = 54{,}7$ *мм вод. ст.*,

$\Delta \Sigma (Rl + Z)_3 = 54{,}3$ *мм вод. ст.*

Расхождение равно 0,4 *мм вод. ст.*, или 0,7%.

II этаж

$\Delta H_2 = 31{,}4$ *мм вод. ст.*,

$\Delta \Sigma (Rl + Z)_2 = 30{,}5$ *мм вод. ст.*

Расхождение равно 0,9, *мм вод. ст.*, или 2,9%.

I этаж

$$\Delta H_1 = 35{,}8 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Delta \Sigma (Rl + Z)_1 = 34{,}5 \text{ мм вод. ст.}$$

Расхождение равно 1,3 *мм вод. ст.* или 3,6%.

Полученные результаты показывают, что принятые выше расходы воды по отдельным приборам и этажам создают сопротивления в трубопроводах, достаточно близко совпадающие с располагаемыми напорами. Наибольшее расхождение между располагаемым напором и сопротивлением составляет всего 3,6%.

В проведенном расчете тепловыделения стояков в помещениях не учитывались (согласно ОСТу). Кроме того, это тепло может быть добавочным только для помещений, в которых проходят стояки; в помещениях, лишенных стояков, определенный выше тепловой режим может быть применен в полной мере.

Все полученные в результате расчета данные сведены в табл. 26.

Таблица 26

Показатели	Место расположения прибора по этажности					
	VI	V	IV	III	II	I
Теплоотдача прибора по расчету, *ккал/час*	1000	800	800	800	800	1000
Расход воды по расчету, *кг/час*	40	32	32	32	32	40
Фактический расход воды, *кг/час*	70	15	12	50	10	15
Расход воды в % к расчетному	175	47	38	156	31	38
Температура воды на входе в прибор по расчету, град.	94,0	93,2	92,2	90,9	89,4	86,9
Фактическая температура воды на входе в прибор, град.	94,0	92,6	91,0	89,3	85,0	78,5
Температура воды на выходе из прибора, град.	79,1	45,0	34,6	72,8	22,3	28,6
Температура помещения, град.	20,0	12,8	10,6	19,5	7,6	8,5

Для сравнения полученного теплового и гидравлического режима стояка (рис. 27) в результате совместного действия на него вертикальной и горизонтальной разрегулировок системы, необходимо в полученных ранее результатах вертикальной разрегулировки также учесть охлаждение воды в трубах, что внесет в распределение расходов воды по этажам некоторые изменения.

Результаты расчета приведены в табл. 27.

Таблица 27

Показатели	Место расположения приборов по этажам					
	VI	V	IV	III	II	I
Теплоотдача прибора по расчету, *ккал/час*	1000	800	800	800	800	1000
Расход воды по расчету, *кг/час*	40	32	32	32	32	40
Фактический расход воды, *кг/час*	76	15	12	62	15	28
Расход воды в % к расчетному	190	47	38	194	47	70
Температура воды на входе в прибор по расчету, град.	94,0	93,2	92,2	90,9	89,4	86,9
Фактическая температура воды на входе в прибор, град.	94,0	92,8	91,6	90,4	88,2	85,0
Температура воды на выходе из прибора, град.	13,8	47,6	56,6	13,6	47,2	33,7
	80,2	45,2	35,0	76,8	41,0	51,3
Температура помещения, град.	20,4	12,9	10,8	20,6	12,6	15,2
	1050	714	680	845	710	943

Сравнение табл. 27 с табл. 26 показывает, что горизонтальная разрегулировка внесла существенные изменения только в расходы воды приборов второго и первого этажей, которые соответственно дополнительно сократились на 16 и 32%. Вертикальная разрегулировка во втором этаже сокращала расход воды на 53% и в первом на 30%. Сравнение даже этого самого дальнего и неблагоприятного стояка показывает, что вертикальная разрегулировка причиняет системе значительно больший вред, чем горизонтальная; и, следовательно, применение в данном случае схемы с попутным движением воды весьма немного приблизит тепловой режим рассматриваемого стояка к нормальному режиму. Применение схемы с попутным движением воды улучшило тепловой режим первых двух этажей, оставив без изменений тепловой режим во всех других этажах. В ближайших стояках сокращение расхода воды под влиянием горизонтальной разрегулировки будет меньшим по сравнению с рассмотренным выше крайним стояком. Распределение для систем рис. 7 и 22 расходов воды по стоякам в результате горизонтальной разрегулировки, без учета „затормаживающего" влияния гравитационного напора, приведено в табл. 28.

Таблица 28

Порядковые номера стояков	6	5	4	3	2	1
Расход воды в % к нормальному	1,38	1,17	1,03	0,86	0,80	0,76

Табл. 28 показывает, что во втором стояке уменьшение расхода воды сокращается на 17%, в третьем — на 32%, в четвертом стояке расход воды близок к норме, в пятом и шестом — выше нормы.

Размеры вертикальной разрегулировки зависят не от порядкового номера стояка, а от величины остаточных напоров, т. е. от достаточно удачного подбора труб по диаметрам в соответствии с располагаемыми напорами. Вертикальная разрегулировка в ближних к центру стояках может оказаться большей, чем в дальних, и поэтому попутное движение воды будет нормализировать тепловой режим в этих стояках, в особенности, если они являются средними. Ближние стояки от попутного движения воды, наоборот, пострадают, так как увеличенный расход воды в них, происходивший из-за горизонтальной разрегулировки, улучшал их работу, попутное же движение воды это улучшение снимает. Последнее обстоятельство, конечно, не может служить доводом против систем с попутным движением, но оно необходимо для понимания происходящих в системе явлений.

Проведенный анализ показывает, таким образом, что попутное движение воды в двухтрубных системах водяного отопления с верхней разводкой хотя и улучшает работу системы, но в полной мере вопроса равномерного прогрева ее не разрешает, так как вертикальная разрегулировка остается и при попутном движении.

Проведенный анализ выявил влияние на тепловой и гидравлический режим отопительной системы как одной вертикальной разрегулировки, так и вертикальной и горизонтальной совместно.

Следует также выявить влияние на отопительную систему одной горизонтальной разрегулировки при отсутствии вертикальной.

Очевидно, что если бы полученные сниженные вследствие горизонтальной разрегулировки расходы воды в стояках принять за основу их регулировки, т. е. устранить в них вертикальную разрегулировку, то, как это было выяснено ранее, снижение расхода тепла даже в самом далеком стояке не превысило бы нескольких процентов. Горизонтальная разрегулировка опасна, следовательно, не столько уменьшением расхода тепла в отстающих стояках, сколько усилением их вертикальной разрегулировки.

Влияние попутного движения воды на горизонтальную разрегулировку систем с нижней разводкой можно установить анализом разобранных ранее примеров.

В табл. 17 и 18 были приведены размеры разрегулировки системы при наличии в ней как вертикальной, так и горизонтальной разрегулировки.

Для решения поставленной задачи необходимо вначале

выяснить, какая часть общей разрегулировки системы (рис. 20) должна быть отнесена на горизонтальную разрегулировку и какая на вертикальную. Систему, имеющую только одну горизонтальную разрегулировку, можно осуществить путем введения во все подводящие к приборам трубы дополнительного сопротивления, равного остаточному напору вертикальной разрегулировки при наличии остаточных напоров, связанных с горизонтальной разрегулировкой.

Определенные расчетом избыточные напоры в *мм вод. ст.*, которые должны быть поглощены дополнительным сопротивлением, по отдельным стоякам и приборам схемы рис. 20, приведены в табл. 29.

Таблица 29

Этаж	Номера стояков					
	1	2	3	4	5	6
I	40	40	38	40	87	285
II	22	22	26	26	74	86
III	29	29	33	33	41	39
IV	0	0	9	9	9	0
V	0	0	0	0	0	0
VI	29	28	32	32	32	0

Введение в трубопроводы дополнительных сопротивлений согласно табл. 29 целесообразнее всего произвести соответствующим теоретическим уменьшением диаметра этих труб.

При заданных расчетных расходах воды нагревательными приборами сопротивления в подводящих трубах к приборам невелики по сравнению с сопротивлением всего стояка, в соответствии с чем для упрощения расчетов с некоторым округлением можно принять, что

$$d' = d \cdot H^{-0{,}19} \text{ мм}, \qquad (57)$$

где: d' — уменьшенный диаметр трубы с учетом необходимости поглощения избыточного напора вертикальной разрегулировки;

H — избыточный напор вертикальной разрегулировки в *мм вод. ст*;

d — диаметр подводящей трубы к прибору по основному расчету (15,75 *мм*).

Так как схема (рис. 20) в каждом этаже предусматривает присоединение двух приборов, то эквивалентный двум приборам диаметр трубы, как это было выведено ранее, равен 20,4 *мм*. Для всей схемы эта величина является постоянной.

Определенные в соответствии с формулой (57) и табл. 29 приведенные диаметры подводящих труб сведены в табл. 30.

Таблица 30

Этаж	Номера стояков					
	1	2	3	4	5	6
I	10,1	10,1	10,2	10,2	8,7	7,0
II	11,5	11,5	11,0	11,0	9,1	8,8
III	10,8	10,8	10,5	10,5	10,0	10,1
IV	20,4	20,4	16,3	16,3	8,9	20,4
V	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
VI	10,8	10,8	10,5	10,5	10,5	20,4

Аналогичным способом по приведенным диаметрам подводящих к приборам труб можно определить приведенные диаметры стояков и расходы воды по стоякам, сведенные в табл. 31.

Таблица 31

Наименование	Номера стояков					
	1	2	3	4	5	6
Приведенные диаметры стояков, *мм*	32,1	31,7	30,9	30,8	25,5	26,1
Коэфициенты распределения расходов воды	1,0	1,13	1,34	1,85	1,40	1,69
Расход воды в стояке в % к расчетному	71	79	95	132	100	120

Полученные результаты весьма интересны, так как они показывают, что вертикальная отрегулировка системы значительно уменьшила и размеры горизонтальной разрегулировки. Сравнение табл. 31 с данными табл. 17 и 18 показывает, что после вертикальной отрегулировки системы расход воды в первом стояке увеличился в 3,74 раза и достиг 71% нормы, расход воды во втором стояке увеличился в 2,9 раза и достиг 79% нормы и т. д.

Табл. 31 показывает также, что от горизонтальной разрегулировки страдают по существу лишь крайние два стояка и что если бы несколько поджать четвертый и шестой стояки, то вся система в целом работала бы вполне удовлетворительно.

Следовательно, можно утверждать, что и при нижней разводке в двухтрубной системе более опасна не горизонтальная разрегулировка, а вертикальная, и что и при верхней и при нижней разводке система, имеющая одну горизонтальную раз-

регулировку, не будет иметь большой неравномерности прогрева.

Внимание проектировщиков должно быть, следовательно, направлено на изыскание способов ликвидации, в первую очередь, вертикальной разрегулировки.

Применяемые весьма часто на практике системы с попутным движением воды, устраняя горизонтальную разрегулировку, не устраняют более опасной вертикальной разрегулировки.

2. Увеличение расхода воды

Вертикальная разрегулировка двухтрубных систем водяного отопления является следствием наличия в системе гравитационного напора, который, в свою очередь, зависит от температурного перепада воды в нагревательных приборах. Чем больше температурный перепад, тем больше гравитационный напор и тем больше его влияние на перераспределение расходов воды между верхними и нижними этажами. Из этого следует сделать вывод, что системы с температурным перепадом в 25° в гидравлическом отношении менее устойчивы и труднее регулируемы, чем системы с температурным перепадом в 20° и ниже.

Системы, рассчитанные на меньший температурный перепад, в ряде случаев будут создавать меньшую разрегулировку не только вследствие меньшего гравитационного напора, но и в связи с возросшим (при меньшем температурном перепаде) расходом воды, при котором легче уменьшить остаточные напоры, являющиеся основным фактором разрегулировки системы.

В двухтрубной системе влияние температурного перепада на перераспределение по этажам расходов воды можно определить решением уравнений (30)—(35).

Если предположить, что все диаметры труб в системе остаются без изменения (что не только возможно, но до известных пределов для ликвидации остаточных напоров и необходимо), так же, как и тепловые нагрузки, то в уравнениях (30)—(35) при изменении расчетной разности температур будут изменены общий расход воды в стояке G_0 и температуры воды в подающих и обратных трубах t_1 и t_2.

В рассматриваемом примере можно принять:

$$b = 90 + 70 - 2 \times 18 = 124,$$

$$c = 18 + (-30) = 48,$$

$$d = 90 - 70 = 20.$$

Пусть также $t'_н = t_н = -30°$, $t'_1 = t_1 = 90°$ и $n = 1{,}0$.

При расходе тепла нагревательными приборами в 1000 *ккал/час* $G = 50$ *кг/час* и $G_0 = 200$ *кг/час*, тогда по уравнениям (37) и (35″)

$$e = \frac{20 \times (-60 - 90) \times 50}{124 + 2 \times 48} = -682,$$

$$f = \frac{20 \times 50}{124 + 2 \times 48} = 4{,}5$$

и

$$8{,}34 \times 10^{-3} \; G_1'^3 - 1{,}57 \; G_1'^2 + 36{,}5 \; G_1' + 240 = 0.$$

Решение полученного уравнения определит:

$$G_1' = 34 \text{ кг/час} \text{ и } G_2' = 66 \text{ кг/час},$$

$$t_{22}' = 78{,}7° \text{ и } t_{21}' = 64{,}8°,$$

$$t_{в2}' = 19{,}3° \text{ и } t_{в1}' = 16{,}3°.$$

Аналогичным способом определяются расходы воды и температуры по этажам и для других расчетных разностей температур теплоносителя (рис. 28).

Снижение расчетного температурного перепада с 25 до 20° значительно улучшило работу рассматриваемой системы и уменьшило ее вертикальную разрегулировку; при температурном перепаде в 25° разность температур верхнего и нижнего этажей была равной 7,3°, при температурном перепаде в 20° эта разность сократилась до 3°, т. е. уменьшилась почти в 2,5 раза.

В то время как при расчетном температурном перепаде теплоносителя в 25° напор прибора второго этажа превышал фактическое сопротивление трубопровода первого этажа в 13,3 раза, при снижении температурного перепада до 20° это превышение (вследствие уменьшения величины гравитационного напора) сократилось до 4,2 раза, что и обеспечило, соответственно, более равномерный прогрев обоих этажей.

При расчетном температурном перепаде теплоносителя в 10°, та же система дает одинаковый прогрев верхнего и нижнего этажей, не имея практически никакой разрегулировки. Последнее объясняется тем, что при температурном перепаде теплоносителя в 10° расчетное сопротивление участка трубопровода к приборам первого этажа возрастает в 6,25 раза (пропорционально квадрату увеличения расхода воды), а дополнительный гравитационный напор приборов второго этажа одновременно сокращается в 2,5 раза (пропорционально уменьшению температурного перепада).

Таким образом, подтверждаются сделанные ранее выводы, что увеличение температурного перепада в системе затрудняет

ее регулировку и поэтому более целесообразно проектировать отопительные системы на температурный перепад не в 25, а в 20°.

В настоящее время наиболее целесообразен температурный перепад с 95 на 75°, так как в этом случае, помимо указанных выше преимуществ, требуемая к установке поверхность нагрева прибора сокращается на 4%.

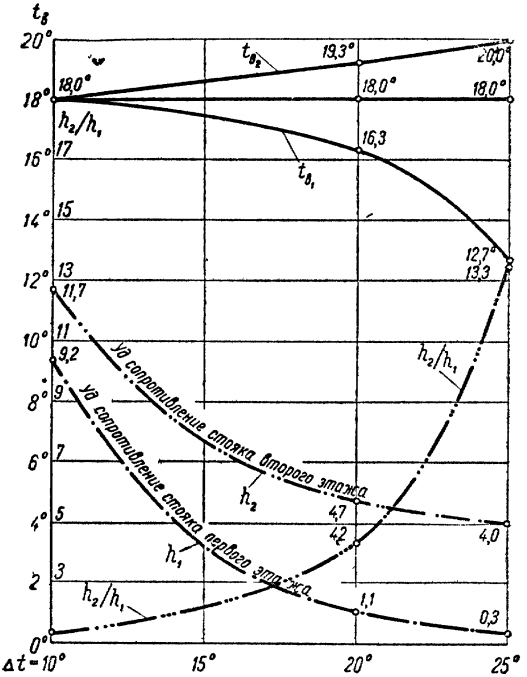


Рис. 28. Разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой в зависимости от изменения расчетной разности температур теплоносителя

Влияние увеличения расхода воды в системе на размеры вертикальной разрегулировки показано на рис. 29, где приведены результаты расчетов по определению размеров вертикальной разрегулировки системы, изображенной на рис. 8, для двух вариантов расхода воды в ней, при изменении кратности этого расхода воды в пределах от 1,0 до 3,0. Рисунок показывает, что увеличение расхода воды в системе относительно быстро ведет к выравниванию тепловых режимов верхних и нижних этажей. Так, например, увеличение расхода воды в системе на 50% в одном случае сократило расхождение между температурами верхнего и нижнего этажей в 4 раза, а в другом — в 5,5 раза.

Улучшение работы отопительных систем путем увеличения в них расхода воды без затраты какой-либо дополнительной энергии может быть осуществлено в отопительных системах, присоединенных к тепловым сетям, в тепловом узле которых имеется запас напора. Последнее имеет обычно место во всех

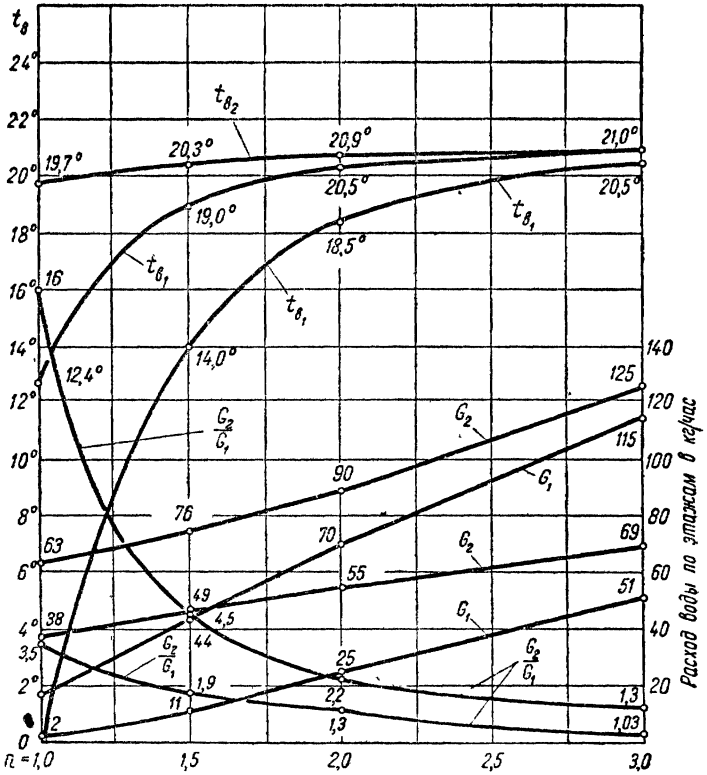


Рис. 29. Зависимость теплового и гидравлического режима двухтрубной двухэтажной системы с верхней разводкой от увеличения в ней расхода воды

системах, расположенных в головной части теплофикационных магистралей.

Избытки напора в тепловых сетях обеспечивают таким объектам возможность увеличения коэфициента смешения и тем самым возможность повышения расхода воды в отопительных системах.

Увеличение коэфициента смешения при том же расходе воды тепловых сетей снижает начальную температуру воды в отопительной системе, что, в свою очередь, приводит к некоторому снижению внутренней температуры помещения, т. е.

к его недогреву. Размер недогрева помещения в зависимости от увеличения коэфициента смешения можно определить решением уравнений (26), в которых неизвестными будут начальная и конечная температура воды в системе t_1' и t_2', расход воды G' и температура помещения $t_в'$.

В качестве необходимых двух дополнительных уравнений могут быть использованы уравнения, определяющие величину коэфициента смешения и уравнение расхода воды элеватором:

$$a' = \frac{t_c - t_1'}{t_1' - t_2'}; \quad \frac{G}{G'} = \frac{1+a}{1+a'}, \tag{58}$$

здесь: a и a' — расчетный и измененный коэфициент смешения;
t_c — температура воды в тепловых сетях;
G и G' — расчетный и измененный расходы воды в системе, откуда

$$t_1' = t_c - \frac{a' \cdot d\left(t_в' - t_н\right)}{c \cdot n}, \tag{59}$$

$$t_2' = t_c - \frac{d\left(a'+1\right)\left(t_в' - t_н\right)}{c \cdot n}. \tag{60}$$

При решении уравнений (58) и (60) принимается:

$$n = \frac{a'+1}{a+1}. \tag{61}$$

По найденным значениям температур t_1' и t_2' можно определить значение внутренней температуры $t_в'$:

$$t_в' = \frac{2ct_c + \left[\left(2a'+1\right)d \cdot n^{-1} + b\right] t_н}{b + (2a'+1)\, d \cdot n^{-1} + 2c}. \tag{62}$$

При $t_c = 130°$, $t_1 = 95°$, $t_2 = 70°$, $t_в = 18°$, $t_н = -30°$ и $a = 1{,}4$:

$$c = 48, \quad b = 129, \quad d = 25 \text{ (см. уравнение 34)}$$

$$t_1' = 130 - \frac{a' \cdot 25\left(t_в' + 30\right)}{48n},$$

$$t_2' = 130 - \frac{25\left(a'+1\right)\left(t_в + 30\right)}{48n}, \tag{63}$$

$$t_в' = \frac{344{,}4 - 30\left(2a'+1\right)n^{-1}}{9 + (2a'+1)\, n^{-1}}. \tag{64}$$

Если увеличить в системе отопления коэфициент смешения с 1,4 до 2, то общий расход воды в ней увеличится до

$$n = \frac{2+1}{1,4+1} = 1,25,$$

и тепловой режим системы будет следующий:

$$t'_в = 17,3°; \quad t'_1 = 90,6° \text{ и } t'_2 = 70,8°.$$

Полученный результат показывает, что увеличение коэфициента смешения с 1,4 до 2 увеличило общий расход в системе на 25%, снизило начальную температуру воды в системе с 95 до 90,6°, повысило обратную температуру воды с 70 до 70,8° и снизило внутреннюю температуру помещения (при температуре наружного воздуха —30°) всего лишь на 0,7°.

Ранее было установлено, что даже относительно небольшое увеличение расхода воды в системе создает заметное улучшение ее работы, снижение же внутренней температуры при этом получается небольшим.

Для того чтобы определить тепловой режим, который установится в системе при том же (измененном) коэфициенте смешения, но при другой температуре наружного воздуха, необходимо в уравнении (62) принять новое значение температуры воды в сети.

Так, например, при $t_н = -10°$ $t_c = 83,3°$ и $t'_в = 17,6°$.

Полученный результат показывает, что с повышением температуры наружного воздуха размер недогрева помещений становится еще меньше.

Пользуясь приведенными выше уравнениями, можно определить тепловые режимы системы при различных коэфициентах смешения и для любой температуры наружного воздуха, указанных в табл. 32.

Таблица 32

Коэфициент смешения	Увеличение расхода воды в системе	$t_н$			$t_н$			$t_н$		
		—30°	—10°	+10°	—30°	—10°	+10°	—30°	—10°	+10°
			t_1			t_2			$t_в$	
1,4	1,00	95,0	62,9	30,8	70,0	48,3	26,7	18,0	18,0	18,0
2,0	1,25	90,6	60,3	30,1	70,8	48,3	26,8	17,3	17,6	17,9
2,5	1,46	88,2	59,0	29,7	71,4	49,2	26,9	16,9	17,3	17,85
3,0	1,67	86,4	57,9	29,4	72,0	49,4	27,0	16,5	17,1	17,8

Главнейшие данные табл. 32 приведены на рис. 30 и 31

Таблица и рисунок показывают, что во всех возможных случаях следует увеличивать коэфициент смешения.

Приведенная выше система уравнений дает возможность определить необходимую температуру теплоносителя, при

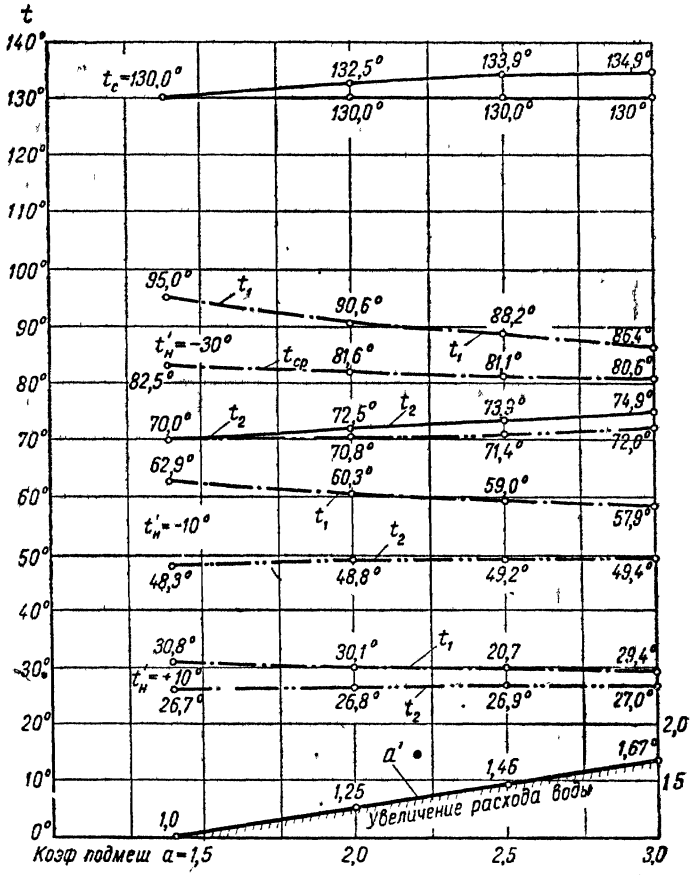


Рис. 30. Зависимость теплового и гидравлического режимов системы от изменения коэфициента смешения

которой нормальный прогрев помещения будет обеспечен и при увеличенном коэфициенте смешения.

Уравнение (26) будет в этом случае иметь следующее значение:

$$1 = \frac{b}{t'_1 + t'_2 - 36} = \frac{d}{n\left(t'_1 - t'_2\right)}, \qquad (26')$$

где n — коэфициент увеличения расхода воды в системе.

Решение уравнения (26′) относительно температур теплоносителя приводит к следующим результатам:

$$t_1' = t_c - a' \cdot d \cdot n^{-1},$$

$$t_2' = t_c - (a' + 1) \cdot n^{-1}$$

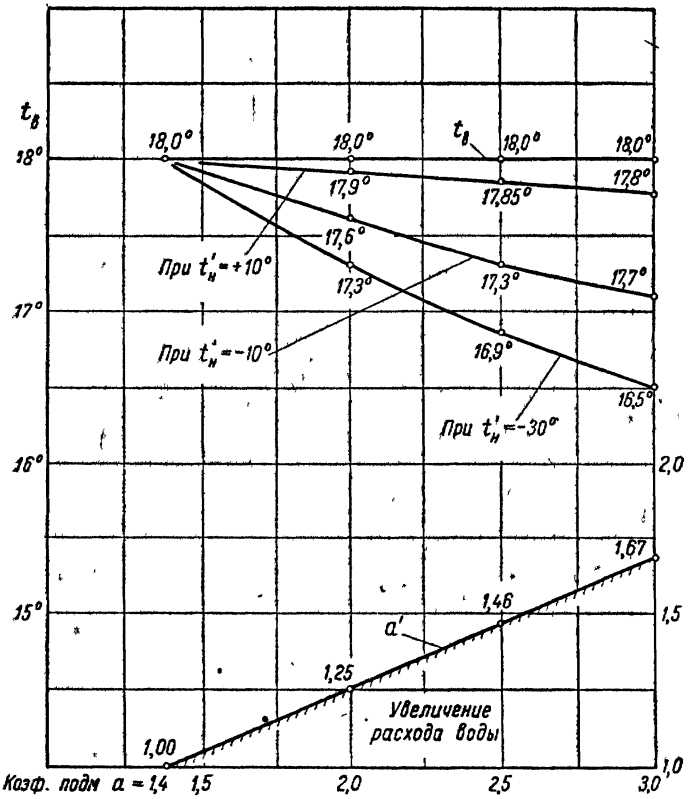


Рис. 31. Зависимость внутренних температур от увеличения коэфициента смешения

и, соответственно:

$$t_c = 0{,}5b + 0{,}5\,(2a' + 1) \cdot d \cdot n^{-1} + 18.$$

При $b = 129°$, $d = 25°$, $a' = 2{,}0$ и $n = 1{,}25$

$$t_c = 132{,}5°, \quad t_1' = 92{,}5°, \quad t_2' = 72{,}5°.$$

Полученный результат показывает, что при увеличении коэфициента смешения с 1,4 до 2 для нормального обогрева помещений температуру теплоносителя необходимо поднять на 2,5°.

Температура теплоносителя местной системы опустится при этом на 2,5°, а температура обратной воды на те же 2,5° поднимется. Зависимость температуры теплоносителя от коэфициента смешения показана на том же рис. 30.

Выше было указано, что избытки напора в тепловых сетях бывают обычно в головных участках магистралей, где температура теплоносителя несколько выше, чем в концевых участках, что и делает целесообразным применение изложенного выше способа для улучшения работы отопительных систем.

В концевых участках тепловых сетей, где температура теплоносителя может быть ниже нормы, необходимо увеличивать пропуск через систему сетевой воды, что также будет способствовать увеличению расхода воды в системе и улучшению ее работы.

В том случае, если после присоединения местной системы к теплосети в котельной остался насос, то им обычно пользуются для увеличения расхода воды в системе, предпочитая в этом случае иметь во всей системе чуть пониженную, но зато более равномерную температуру.

3. Установка шайб сопротивления

Регулирование систем отопления имеет своей задачей обеспечить во всех помещениях одинаковые внутренние температуры.

Регулировка систем проводится обычно при пуске их в эксплоатацию. Так как регулировка стояка или нагревательного прибора нарушает регулировку соседних приборов, а существующие регулировочные краны имеют недостаточно удовлетворительные характеристики, добиться необходимого эффекта на практике очень трудно. Особенно трудно добиться установления расчетных расходов воды и равномерной внутренней температуры в системах с естественной циркуляцией, гидравлическое сопротивление которых незначительно.

Регулировка системы преследует в основном цель погашения в стояках и нагревательных приборах остаточных (расчетных) напоров.

В результате проведенного ранее анализа было выявлено, что на распределение потоков воды по этажам в двухтрубной системе отрицательно влияют остаточные напоры, создающиеся вследствие наличия в системе изменяющихся по этажам гравитационных напоров, а также из-за отсутствия в отопительных системах труб диаметром менее $^1/_2$".

Нарушение нормального теплового режима системы происходит, как ранее было определено, даже при сравнительно больших расходах в приборах воды [в рассмотренных ранее примерах (рис. 9) превышение расхода воды во втором этаже по сравнению с первым доходило до 6,5, в результате чего температура в первом этаже снижалась с 18 до 8°].

Столь большое расхождение расходов воды объясняется тем, что в двух параллельно включенных участках трубопроводов отопительной системы действуют значительно различающиеся по величине гравитационные напоры. Если не учитывать охлаждения воды в трубах, то соотношение указанных напоров составит:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{h_{II}(\gamma_2 - \gamma_1)}{h_I(\gamma_2 - \gamma_1)} = \frac{3{,}65}{0{,}25} = 14{,}6.$$

Столь большое превышение гравитационного напора второго этажа по сравнению с гравитационным напором тех же участков труб первого этажа обусловливает, в тех случаях, когда сопротивление трубопроводов первого этажа мало, указанное большое перераспределение потоков воды между первым и вторым этажами.

Соотношение суммарных напоров второго и первого этажей (насоса и гравитационного напора) зависит от нагрузки стояка и его диаметров.

На рис. 9 и 10 приведены расчетные и получающиеся при перераспределении расхода воды удельные падения напоров и отношение возникающего во втором этаже дополнительного гравитационного напора к сопротивлению параллельно включенного участка трубопровода первого этажа, а также перераспределение расходов воды между обоими этажами.

Из рис. 10 видно, что при расходе тепла в 750 *ккал/час* на прибор (что является далеко не малой нагрузкой) расчетное соотношение напоров достигает 17, а фактическое—40, и только при расходе тепла в 1500 *ккал/час* на прибор указанное соотношение снижается до 5 и 3,7.

Малые скорости движения воды в трубопроводах первых этажей и, соответственно, малые их сопротивления из-за несоответствия диаметров труб расчетным расходам воды создают те трудности регулировки двухтрубных систем, с которыми на практике приходится так часто встречаться.

Точная отрегулировка двухтрубной системы любой этажности может быть достигнута установкой автоматически действующих регулировочных кранов. Однако необходимы и другие мероприятия, с помощью которых можно было бы отрегулировать плохо работающие существующие отопительные системы. Для вновь проектируемых систем необходимо изыскивать более радикальные мероприятия, которые обеспечили бы более устойчивые тепловые и гидравлические режимы и для регулировки которых не требовалось бы столько усилий, сколько требуют иногда двухтрубные системы.

Одним из способов, которым можно отрегулировать двухтрубную систему, является установка в трубопроводах шайб, поглощающих те избыточные напоры, которые в основном и создают вертикальную разрегулировку.

Диаметры отверстий шайб определяются обычно по формуле:

$$d = 2G^{0,5}H^{-0,25}; \qquad (65)$$

здесь G — расход воды в *кг/час* и H — сопротивление шайбы в *мм вод. ст.*

Расчет трубопроводов рис. 7 показал, что все нагревательные приборы имеют остаточные напоры (графически показанные на схеме).

Вычисленные по уравнениям (65) отверстия шайб для всех приборов двух крайних стояков приведены в табл. 33 и показаны на рис. 7.

Таблица 33

Диаметры отверстий шайб стояков	Этаж					
	VI	V	IV	III	II	I
Стояк 1, *мм* . .	3,3	3,4	3,8	3,7	5 2	—
Стояк 6, *мм* . .	2,7	2,9	3,8	4,4	3,6	4,3

Табл. 33 показывает, что в установке регулировочных шайб нуждаются почти все нагревательные приборы и что даже приборы первого этажа иногда не будут являться в этом отношении исключением. Обращает на себя внимание также и то, что диаметры отверстий всех шайб достаточно близки друг к другу, а следовательно, в их расчеты можно ввести упрощения.

Установка индивидуальных шайб, рассчитанных на поглощение фактически получающихся остаточных напоров в каждом приборе, приведет к усложнению расчета системы и затруднит монтаж ее. Особо затруднительна установка индивидуальных шайб в существующей системе, поскольку в ней почти невозможно определить остаточные напоры.

Более прост и практически приемлем был бы способ, уничтожающий получающееся в системе расхождение напоров и расходов воды по этажам. Последнего можно добиться не только поглощением остаточных напоров, но и вводом дополнительных и притом совершенно одинаковых сопротивлений во все нагревательные приборы.

Если в трубопровод на ответвлении к каждому нагревательному прибору схемы (рис. 8) ввести дополнительное местное сопротивление (дроссельную шайбу), то характеристика гидравлического сопротивления этого участка трубопровода изменится и может быть определена следующим уравнением:

$$H = H_т + H_ш = S_т G^2 + S_ш G^2. \qquad (66)$$

Здесь: $H_т$ и $H_ш$ — приведенное сопротивление трубопровода и сопротивление введенной добавочно шайбы;

$S_т$ и $S_ш$ — характеристики гидравлического сопротивления трубопровода и шайбы.

Из уравнения (66) характеристика гидравлического сопротивления шайбы может быть определена следующим образом:

$$S_ш = H_ш \cdot G^{-2}. \qquad (67)$$

Установка одинаковых дополнительных сопротивлений в оба нагревательные прибора изменит основное расчетное уравнение, а также, соответственно, и уравнения (33) и (35) следующим образом:

$$A = 4S_1'' + S_2 + S_ш = 4S_1' + S_1 + S_ш.$$

В остальном методика определения теплового и гидравлического режима системы и размеров разрегулировки остается без изменений.

Пусть требуется определить при открытых кранах размеры разрегулировки двухтрубной системы по схеме рис. 8 для двух расходов воды нагревательными приборами в 30 и 40 *кг/час*

$$G_0 = 2G_1 + 2G_2 = 120 \text{ кг/час}$$

и

$$G_0 = 2G_1 + 2G_2 = 160 \text{ кг/час}.$$

Пусть далее величина дополнительного сопротивления при нагревательных приборах $H_ш$ равна 50 *мм вод. ст.*, тогда

$$S_ш = H_ш \cdot G^{-2} = 55{,}5 \times 10^{-3},$$

$$S_1 = S_т + S_ш = (1{,}3 + 55{,}5) \times 10^{-3} = 56{,}8 \times 10^{-3},$$

$$A = 4S_1'' + S_2 = 4S_1' + S_1 = (7{,}04 + 56{,}8) \times 10^{-3} = 63{,}84 \times 10^{-3}.$$

Так как в уравнениях (37) и (35) $n = 1$, т. е. расход воды в системе предполагается постоянным и равным расчетному, то оно может быть, с учетом постоянства основных коэфициентов b, c, d и t_1', преобразовано следующим образом:

$$AG_1'^3 - 0{,}75AG_0G_1'^2 + \left(0{,}11AG_0^2 - 16{,}36\right)G_1' + 0{,}004AG_0 = 0. \qquad (68)$$

При $G_0 = 120$ *кг/час*, $A = 63{,}84 \times 10^{-3}$ уравнение (68) будет иметь следующее значение:

$$63{,}84 \times 10^{-3}G_1'^3 - 5{,}75G_1'^2 + 82{,}36G_1' + 408 = 0.$$

Решение полученного уравнения любым из примененных выше способов определит следующее распределение расходов воды по этажам, температуру обратной воды и внутренние температуры:

$$G_1' = 23 \text{ кг/час}, \quad G_2' = 37 \text{ кг/час};$$

$$t_{22}' = \frac{95G_2' - 4{,}3G_0}{G_2' + 0{,}028G_0},$$

$$t_{21}' = \frac{95G_1' - 4{,}3G_0}{G_1' + 0{,}028G_0}, \qquad (69)$$

откуда

$$t_{22}' = 74{,}5^\circ \text{ и } t_{21}' = 63{,}5^\circ;$$

$$t_{в2}' = \frac{690 + 48t_{22}'}{225} \text{ и } t_{в1}' = \frac{690 + 48t_{21}'}{225}, \qquad (70)$$

откуда

$$t_{в2}' = 19{,}0^\circ \text{ и } t_{в1}' = 16{,}7^\circ.$$

Полученный результат показывает, что имевшаяся в системе разрегулировка (см. исходное положение графика на рис. 32) значительно сократилась. Вводом у обоих нагревательных приборов одного и того же дополнительного сопротивления (всего в размере 50 *мм вод. ст.*) расход воды в приборах первого этажа увеличен с 8 *кг/час* до 23 *кг/час*, т. е. с 26,6% нормы до 76,5%, и температура помещения первого этажа поднята с +8,0 до 16,7°, температура помещения второго этажа при этом снижена с 20,4° до 19,0°.

Если дополнительное сопротивление принять не в 50, а в 100 *мм вод. ст.*, то характеристика гидравлического сопротивления шайб будет следующей:

$$S_ш = H_ш \cdot G^{-2} = 100 \times 30^{-2} = 111{,}1 \times 10^{-3}$$

и, соответственно:

$$S_1 = S_т + S_ш = (1{,}3 + 111{,}1) \times 10^{-3} = 112{,}4 \times 10^{-3},$$

следовательно,

$$A = (7{,}04 + 112{,}4) \times 10^{-3} = 119{,}44 \times 10^{-3}.$$

При том же расходе воды в стояке $G_0 = 120$ *кг/час* получится:

$$119{,}4 \times 10^{-3} \cdot G_1'^3 - 10{,}74 \cdot G_1'^2 + 173{,}1G_1' + 830 = 0,$$

откуда

$$G_1' = 27{,}2 \text{ кг/час} \text{ и } G_2' = 32{,}8 \text{ кг/час}; \quad t_{22}' = 72{,}1^\circ, \quad t_{21}' = 67{,}6^\circ;$$

$$t_{в2}' = 18{,}4^\circ \text{ и } t_{в1}' = 17{,}4^\circ.$$

Полученные результаты показывают, что введение дополнительных сопротивлений в размере 100 *мм вод. ст.* почти уравняло расходы воды и внутренние температуры второго и первого этажей. Разность температур осталась равной всего

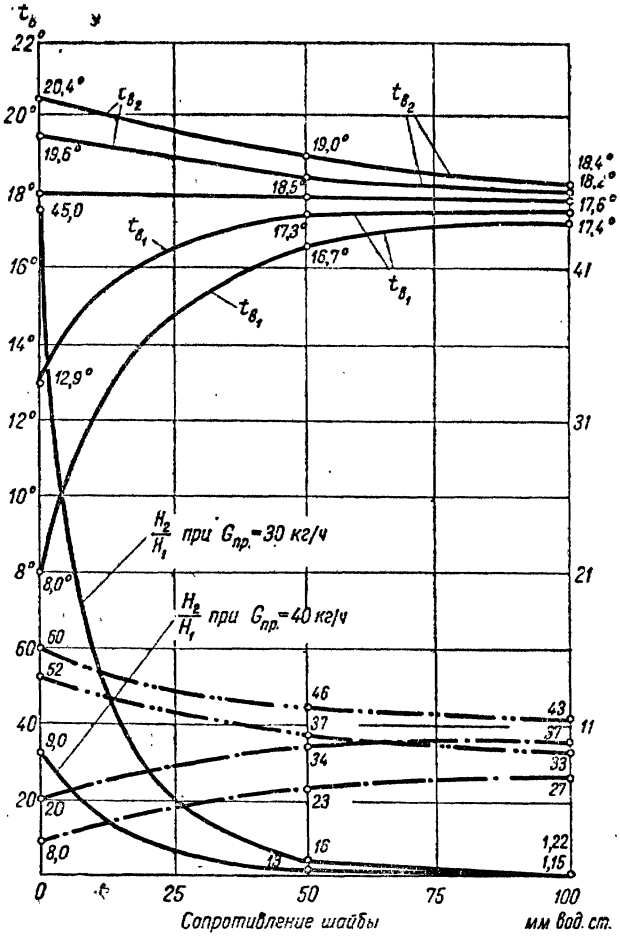


Рис. 32. Влияние на тепловой и гидравлический режим двухэтажной системы установки шайб сопротивления

одному градусу. Следует напомнить, что эта разность получается при расчетной наружной температуре, когда поэтажная разрегулировка достигает своего максимума.

Таким же способом можно определить размеры разрегулировки системы при расчетном расходе тепла нагревательными приборами в 1000 *кал/час*. Все полученные в результате расчетов данные приведены в табл. 34 и на рис. 32.

Таблица 34

G	0				50 *мм вод. ст.*				100 *мм вод. ст.*			
	G	G_2	$t_{в1}$	$t_{в2}$	G_1	G_2	$t_{в1}$	$t_{в2}$	G_1	G_2	$t_{в1}$	$t_{в2}$
60	8	52	8,0	20,4	23	37	16,7	19,0	27	33	17,4	18,4
80	20	60	12,9	19,6	34	46	17,3	18,5	37	43	17,6	18,2

График (рис. 32) показывает, что введение на подводящих трубопроводах к нагревательным приборам дроссельных шайб выравнивает тепловые режимы обоих этажей, резко повышает внутреннюю температуру первого этажа, сокращая разницу между температурами первого и второго этажей.

При рассмотрении рис. 32, учитывая, что он построен для температуры наружного воздуха — 30°, становится очевидным, что применения шайб с сопротивлением более 100 *мм вод. ст.* не требуется.

На рис. 32 также показаны для обоих вариантов расход воды нагревательными приборами и отношения сопротивлений трубопроводов второго и первого этажей без шайбы к сопротивлениям этих трубопроводов с шайбами при $H_ш = 50$ и 100 *мм вод. ст.*

Рассмотрение указанных кривых сопротивлений показывает, что разрегулировка системы получается значительной тогда, когда в параллельных кольцах действуют свободные напоры, в несколько раз превосходящие друг друга, что всегда может иметь место в двухтрубных системах отопления с относительно малым расходом воды и с большими перепадами температур воды.

Табл. 34 и график рис. 32 дают представление о влиянии на регулировку системы установки шайб в двухэтажной системе. Необходимо выяснить, каково будет влияние установки шайб в многоэтажной системе (рис. 7), разрегулировка которой при открытых кранах, как было выявлено ранее, может достигнуть весьма больших размеров.

В данной системе приборы верхнего и нижнего этажей рассчитаны на пропуск в 40 *кг/час* воды, а во всех средних этажах — по 32 *кг/час*; соответственные характеристики гидравлических сопротивлений шайб при сопротивлении их в 50 *мм вод. ст.* будут:

$$S_{кр} = 50 \cdot G_{кр}^{-2} = 50 \times 40^{-2} = 32{,}0 \times 10^{-3},$$

$$S_{ср} = 50 \times 32^{-2} = 48{,}8 \times 10^{-3}.$$

Распределение потоков воды по этажам этой системы при введении в нее дроссельных шайб определится решением следующей системы уравнений:

$$(S_к + S_c) G_6^2 + S_5'' (2G_6)^2 - S_5' (G_0 - 2G_6)^2 - (S_c + S_5) G_5^2 = \Delta H_6,$$

$$(S_c + S_5) G_5^2 + 4S_4'' (G_6 + G_5)^2 - S_4' (G_0 - 2G_6 - 2G_5)^2 - (S_c + S_4) G_4^2 = \Delta H_5,$$

$$(S_c + S_4) G_4^2 + 4S_3'' (G_6 + G_5 + G_4)^2 - S_3' (G_0 - 2G_6 + 2G_5 + 2G_4)^2 - (S_c + S_3) G_3^2 = \Delta H_4,$$

$$(S_c + S_3) G_3^2 + 4S_2'' (G_6 + G_5 + G_4 + G_3)^2 - S_2' (G_0 - 2G_6 - 2G_5 - 2G_4 - 2G_3)^2 - (S_c + S_2) G_2^2 = \Delta H_3,$$

$$(S_c + S_2) G_2^2 + 4S_1'' (G_6 + G_5 + G_4 + G_3 + G_2)^2 - 4S_1' G_1^2 - (S_к + S_1) G_1^2 = \Delta H_2,$$

$$\Sigma G = G_0 = G_6 + G_5 + G_4 + G_3 + G_2 + G_1. \qquad (71)$$

В приведенной системе уравнений

$$S_к = 32 \times 10^{-3}, \quad S_c = 48{,}8 \times 10^{-3}, \quad S_1 = S_2 = \ldots = S_6 = 1{,}3 \times 10^{-3},$$

$$S_1' = S_2' = S_5'' = S_4'' = S_3'' = 1{,}76 \times 10^{-3},$$

$$S_3' = S_4' = S_5' = S_2'' = S_1'' = 0{,}37 \times 10^{-3}.$$

Кроме того, с достаточной для данного анализа точностью определение разностей напоров по этажам можно принять по следующей зависимости:

$$\Delta H_6 = \frac{50 \times 40}{G_6}; \quad \Delta H_5 = \frac{50 \times (40 + 32)}{G_6 + G_5};$$

$$\Delta H_4 = \frac{50 \times (40 + 32 + 32)}{G_6 + G_5 + G_4}; \quad \Delta H_3 = \frac{50 \times 136}{G_6 + G_5 + G_4 + G_3};$$

$$\Delta H_2 = \frac{50 \times 168}{G_6 + G_5 + G_4 + G_3 + G_2}.$$

Решение приведенной системы уравнений определит следующие расходы воды по этажам: $G_6 = 55$, $G_5 = 32$, $G_4 = 28$, $G_3 = 38$, $G_2 = 28$ и $G_1 = 33$.

Распределение расходов воды по этажам без шайб было показано на рис. 12.

Полученные результаты говорят о том, что и в многоэтажной системе введение добавочных сопротивлений в размере 50 *мм вод. ст.* значительно приблизило все расходы воды по этажам к норме.

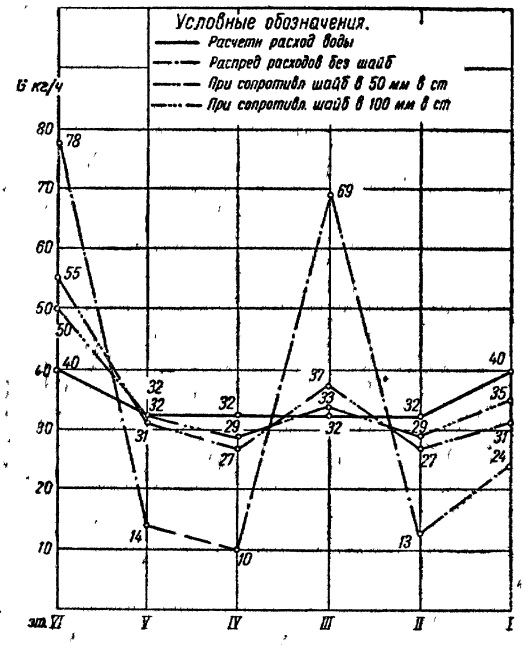


Рис. 33. Влияние на гидравлический режим шестиэтажной системы установки шайб сопротивления

Если в данную систему ввести дополнительное сопротивление шайбами в размере 100 *мм вод. ст.*, то характеристики гидравлических сопротивлений шайб будут следующими:

$$S_к = 100 \cdot G_к^{-2} = 100 \times 40^{-2} = 62{,}5 \times 10^{-3},$$

$$S_с = 100 \times 32^{-2} = 98 \times 10^{-3},$$

и соответствии с чем $G_6' = 50$, $G_5' = 32$, $G_4' = 29$, $G_3' = 33$, $G_2' = 29$, $G_1' = 35$, что, по отношению к расчетным расходам воды, составляет: $G_6' = 1{,}25G_6$, $G_5' = G_5$, $G_4' = 0{,}91G_4$, $G_3' = 1{,}03G_3$, $G_2' = 0{,}91G_2$ и $G_1' = 0{,}87G_1$.

Полученный результат показывает, что введение дополнительных сопротивлений в размере 100 *мм вод. ст.* еще более приблизило расходы воды по всем этажам к расчетным. Только в одном шестом этаже, в котором остаточный напор был значительно выше других, перерасход воды достигает 25%, во всех же других этажах расхождение полученных расходов воды с расчетными значительно меньше.

Полученные расчетные данные приведены в табл. 35 и на рис. 33.

Таблица 35

Показатели	№№ этажей					
	VI	V	IV	III	II	I
Расчетный расход воды, *кг/час* и %	40/100	32/100	32/100	32/100	32/100	40/100
Расход воды без шайб, *кг/час* и %	78/195	14/44	10/31	69/216	13/41	24/60
Расход воды при сопротивлении шайбы в 50 *мм вод. ст., кг/час* и %	55/137	31/97	27/84	37/115	27/84	31/78
Расход воды при сопротивлении шайбы в 100 *мм вод. ст., кг/час* и %	50/125	32/100	29/91	33/103	29/91	35/87

Табл. 35 и график рис. 33 показывают, что и в многоэтажной системе при установке шайб у приборов расходы воды по этажам выравниваются и разрегулировка системы резко сокращается. Необходимое сопротивление шайб для многоэтажной системы, так же, как и в разобранной ранее двухэтажной, не превышает 100 *мм вод. ст.*

Из полученных расходов воды ясно, что при этом внутренние температуры будут весьма близкими к расчетным.

В рассмотренном примере наибольшее отклонение от расчетного расхода воды наблюдается в первом этаже, где оно равно 87% нормы.

Соответствующая этому расходу внутренняя температура равна 17,3°; таким образом отклонение от нормы даже при расчетной наружной температуре составляет всего 0,7°.

Если расход воды в нагревательном приборе определять по количеству установленных секций, то диаметры отверстий шайб для систем с расчетными перепадами в 25 и 20° с некоторым округлением могут быть определены в *мм* по табл. 36.

Таблица 36

Температурный перепад, град.	Сопротивление шайбы, *мм вод. ст.*	Количество секций				
		3—4	5—6	7—8	9—10	11—12
25	100	2,5	3,2	3,7	4,2	4,6
20	100	2,8	3,5	4,1	4,6	5,1

В обычных двухтрубных системах отопления количество секций в одном нагревательном приборе редко выходит за пределы двенадцати, следовательно, для современных систем, рассчитанных на температурный перепад в 25°, практически достаточно в основном применения лишь нескольких номеров шайб. Округлив полученные цифры, можно рекомендовать следующие диаметры отверстий шайб (табл. 37).

Таблица 37

Количество секций	3—4	5—6	7—8	9—10	11—12	13—14	15—16
Номер шайбы	3	5	7	9	11	13	15
Диаметр, *мм*	2,5	3,1	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3

Сравнение табл. 37 с предыдущей показывает, что эти же шайбы могут быть установлены и в системах с температурным перепадом в 20°. Сопротивление их в этом случае будет несколько выше, а условия работы лучше. Такие шайбы будут как бы вкладышами в краны и могут составлять с ними одно целое.

Установка у нагревательных приборов дроссельных шайб облегчает не только вертикальную поэтажную регулировку, но также и горизонтальную по стоякам, так как с вводом в нагревательные приборы добавочных сопротивлений уменьшается и разность напоров по стоякам.

Для определения влияния установки шайб у нагревательных приборов на уменьшение размеров горизонтальной разрегулировки можно использовать все выведенные основные уравнения. Ранее при выявлении размеров горизонтальной разрегулировки системы (рис. 7) были определены эквивалентные диаметры стояков и все необходимые характеристики гидравлического сопротивления стояков и магистралей.

При введении в систему дополнительных сопротивлений характеристики гидравлического сопротивления стояков изменятся в соответствии с размером этих сопротивлений.

При введении в систему сопротивлений в размере 100 *мм вод. ст.* и при одном и том же расходе воды во всех стояках (416 *кг/час*) характеристика гидравлического сопротивления шайбы, согласно уравнению (78), будет следующей:

$$S_ш = H_ш \cdot G^{-2} = 100 \times 416^{-2} = 0{,}58 \times 10^{-3}.$$

Характеристики гидравлического сопротивления стояков системы рис. 22 при введении в них дополнительных сопротивлений будут следующими:

$$S_1 = 1{,}56 \times 10^{-3},\ S_2 = 1{,}79 \times 10^{-3},\ S_3 = 1{,}87 \times 10^{-3},$$

$$S_4 = 1{,}93 \times 10^{-3},\ S_5 = 1{,}96 \times 10^{-3} \text{ и } S_6 = 2{,}03 \times 10^{-3}.$$

Значения характеристик гидравлических сопротивлений участков магистральных трубопроводов остаются, естественно, без изменений.

Коэфициенты распределения расходов воды по уравнению (45′) будут: $\nu_2 = 1{,}035$, $\nu_3 = 1{,}10$, $\nu_4 = 1{,}25$, $\nu_5 = 1{,}39$ и $\nu_6 = 1{,}62$.

Найденные коэфициенты распределения расходов воды дают возможность определить по уравнению (45″) соотношение расходов воды по стоякам:

$$G_1' = \frac{6G_1}{1 + 1{,}03 + 1{,}10 + 1{,}25 + 1{,}39 + 1{,}62} = 0{,}81G_1$$

и, соответственно:

$$G_2' = 1{,}03 \times 0{,}81G_1 = 0{,}83G_1;\quad G_3' = 1{,}10 \times 0{,}81G_1 = 0{,}89G_1;$$

$$G_4' = 1{,}25 \times 0{,}81G_1 = 1{,}02G_1;\quad G_5' = 1{,}39 \times 0{,}81G_1 = 1{,}13G_1;$$

$$G_6' = 1{,}62 \times 0{,}81G_1 = 1{,}32G_1.$$

Сравнение полученных расходов воды в стояках с ранее найденным распределением расходов воды показывает, что установка шайб у нагревательных приборов уменьшает размеры и горизонтальной разрегулировки; так, например, наибольший недорасход воды (в первом стояке) сократился с 24% до 19% нормы, т. е. уменьшился на 21%.

Единственным недостатком установки шайб у нагревательных приборов является возможность их засорения, так как диаметр отверстия их при малом количестве секций (3—4) доходит до 2,5 *мм*.

Практика работы систем с шайбами, однако, показывает, что опасения эти сильно преувеличены. Один из объектов теплосети Мосэнерго, в котором были установлены шайбы со

значительно меньшими диаметрами отверстий (до 1,2 *мм* включительно), не имел ни одного перерыва в работе из-за засорения шайб в течение двух отопительных сезонов.

Исключать возможность засорения шайб, хотя бы на первом этапе их применения, не следует. Для того чтобы прочистка отверстия могла быть осуществлена на ходу, без спуска из системы воды и разборки ее, была разработана специальная конструкция крана, допускающая такую прочистку путем некоторого изменения косого (можно и другого) вентиля. Такой кран одновременно служит для уменьшения, а также и

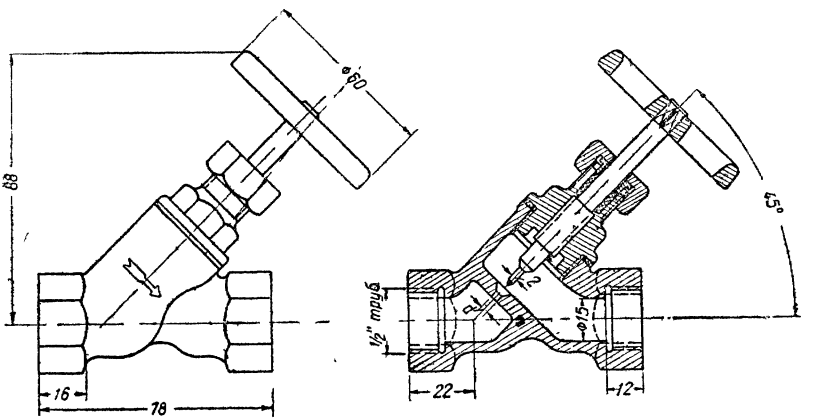


Рис. 34. Косой вентиль с сопротивлением.

для полного прекращения, в случае надобности, теплоотдачи нагревательного прибора. При применении таких кранов и двухтрубные системы, сохраняя все свои положительные свойства, не будут иметь недостатков, связанных с трудностями их регулировки.

Предполагается, что представленный на рис. 34 кран будет отливаться с глухой в середине крана перегородкой. При последующей калибровке проходного отверстия крана на нем должен набиваться и соответствующий номер, показывающий число секций в собранном радиаторе, к которому этот кран должен быть поставлен.

Этот кран, при соответствующем конструктивном оформлении, может быть одновременно и краном двойной регулировки, в котором первичная регулировка будет осуществляться соответствующим подбором номера его, вторичная же регулировка достигаться сокращением расхода воды или полным выключением нагревательного прибора с помощью маховика.

Прочистка крана в случае его засорения осуществляется вращением маховика.

Необходимо дополнительно выяснить, как будет влиять установка шайб на тепловой и гидравлический режим системы при несоблюдении в ней расчетных расходов воды. Ранее было установлено, что влияние это, особенно при низких температурах наружного воздуха, значительно.

Исходными уравнениями при определении теплового и гидравлического режима системы (рис. 8) с установленными в ней шайбами может быть система уравнений (30)—(33), в которой коэфициент расхода воды n должен быть принят переменным и изменены характеристики гидравлического сопротивления участков трубопровода приборов второго и первого этажей.

При установке шайб у приборов в обоих этажах уравнение (33′) будет иметь следующее выражение:

$$\left(S_2+4S_1''+S_ш\right)G_2'^2-\left(S_1+4S_1'+S_ш\right)G_1'^2=2{,}2\left(t_1'-t_{22}'\right)-$$
$$-0{,}15\left(t_1'-t_{21}'\right).$$

Ранее было выведено, что:

$$S_1+4S_1'=8{,}34\times10^{-3}$$

и

$$S_ш=H_ш\cdot G^{-2}.$$

Если принять, что при заданных расходе воды и температурах теплоносителя и наружного воздуха в системе не будет разрегулировки, т. е.

$$G_2'=G_1' \text{ и } t_{22}'=t_{21}'=t_2,$$

то в этом случае

$$S_2+4S_1''+S_ш=8{,}34\times10^{-3}+H_ш G^{-2}+2{,}05\left(t_1-t_2\right)G^{-2}. \quad (72)$$

В соответствии с полученным равенством выведенное выше уравнение может быть преобразовано в следующее:

$$\left[8{,}34\times10^{-3}+H_ш\cdot G^{-2}+2{,}05\left(t_1-t_2\right)G^{-2}\right]G_2'^2-\left(8{,}34\times10^{-3}+\right.$$
$$\left.+H_ш G^{-2}\right)G_1'^2=2{,}2\left(t_1'-t_{22}'\right)-0{,}15\left(t_1'-t_{21}'\right). \quad (73)$$

Выведенное уравнение учитывает установленные у нагревательных приборов шайбы с сопротивлением в *Н мм вод. ст.* и предполагает равенство расходов воды и температур в обоих этажах при расчетных условиях. За расчетные условия в выведенном уравнении может быть принята любая температура наружного воздуха, в соответствии с которой должны быть в уравнении (73) определены значения для t_1 и t_2 (30)—(33).

Уравнение (73) совместно с основной системой уравнений дает возможность решить поставленную выше задачу для любых расчетных условий.

Пусть требуется определить влияние установки шайб на гидравлическую устойчивость системы, отрегулированной при температуре наружного воздуха — 30° с расчётным расходом воды одним прибором в 30 *кг/час* при сопротивлении шайбы в 50 и 100 *мм вод. ст.*, т. е. $H_ш$=50 *мм вод. ст.*, G=30 *кг/час*, $t_1 = t'_1 = 95°$ и $t_2 = 70°$,

$$t_н = t'_н = -30°,\quad b = 129,\quad c = 48,\quad d = 25.$$

Тогда на основании уравнения (37):

$$e = -17{,}22\ G \text{ и } f = 0{,}11G. \tag{74}$$

На основании уравнений (30), (34) и (74)

$$G'_1 = 2nG - G'_2$$

и, соответственно:

$$t'_{22} = \frac{t'_1\ G'_2 - 17{,}22G}{G'_2 + 0{,}11G}$$

и

$$t'_{21} = \frac{t'_1\left(2nG - G'_2\right) - 17{,}22G}{2nG - G'_2 + 0{,}11G}. \tag{75}$$

После преобразований уравнения (73) можно получить:

$$\left[8{,}34 \times 10^{-3} + \left(H_ш + 51{,}25\right)G^{-2}\right]G'^{2}_2 - \left(8{,}34 \times 10^{-3} + \right.$$

$$\left. + H_ш G^{-2}\right) \times \left(2nG - G'_2\right)^2 + 2{,}2\,\frac{95G'_2 - 17{,}22G}{G'_2 + 0{,}11G} - 0{,}15 \times$$

$$\times \frac{95\left(2nG - G'_2\right) - 17{,}22G}{2nG - G'_2 + 0{,}11G} - 195 = 0. \tag{76}$$

Полученное уравнение дает возможность определить распределение расходов воды в стояке (рис. 8) при различных заданных в нем расчетных расходах воды и гидравлических сопротивлениях установленных в нем шайб для любого уменьшения в нем этого расчетного расхода воды.

Если принять по предыдущему расчетный расход воды одним прибором (на который система предполагается отрегулированной) в 30 *кг/час*, соответственный расчетный расход

воды в стояке 120 *кг/час* и сопротивление шайб у приборов 50 *мм вод. ст.*, то уравнение (76) будет иметь следующий вид:

$$120{,}84\times10^{-3}G_2'^2-63{,}89\times10^{-3}\left(60n-G_2'\right)^2+2{,}2\times\frac{95G_2'-516{,}6}{G_2'+3{,}3}-$$
$$-0{,}15\times\frac{95\left(60n-G_2'\right)-516{,}6}{60n-G_2'+3{,}3}-195=0. \qquad (77)$$

При $n=0{,}8$ (уменьшение расчетного расхода воды на 20%) решение полученного уравнения приводит к следующим результатам:

$$G_2'=26{,}6\ кг/час \text{ и } G_1'=21{,}4\ кг/час,$$

$$t_{22}'=67{,}3^\circ \text{ и } t_{21}'=61{,}3^\circ,$$

$$t_{в2}=\frac{48\times95+48\times67{,}3-129\times30}{129+2\times48}=17{,}5^\circ,$$

$$t_{в1}'=\frac{48\times95+48\times61{,}3-129\times30}{129+2\times48}=16{,}2^\circ.$$

Полученный результат показывает, что при уменьшении расчетного расхода воды в стояке с установленными шайбами на 20% расхождение внутренних температур второго и первого этажей составило всего 1,3°.

При уменьшении того же расчетного расхода воды на 50% и при том же сопротивлении шайб в 50 *мм вод. ст.* решение уравнения (77) дает:

$$G_2'=22{,}5\ кг/час \text{ и } G_1'=7{,}5\ кг/час,$$

$$t_{22}'=62{,}8^\circ \text{ и } t_{21}'=18{,}1^\circ,$$

$$t_{в2}''=16{,}4^\circ \text{ и } t_{в1}'=6{,}9^\circ.$$

Расхождение температур в этом случае достаточно большое, однако оно примерно в два раза меньше, чем при отсутствии у приборов шайб.

При сопротивлении шайб в 100 *мм вод. ст.* уравнение (76) будет иметь следующее значение:

$$176{,}39\times10^{-3}\times G_2'^2-119{,}45\times10^{-3}\times\left(60n-G_2'\right)^2+$$
$$+2{,}2\frac{95G_2'-517}{G_2'+3{,}3}-0{,}15\times\frac{95\times\left(60n-G_2'\right)-517}{60n-G_2'+3{,}3}-195=0.$$

Решение полученного уравнения для $n = 0{,}8$ приводит к следующим результатам:

$$G_2' \quad 26 \text{ кг/час и } G_1' = 22 \text{ кг/час},$$

$$t_{22}' = 66{,}5° \text{ и } t_{21}' = 62{,}2°,$$

$$t_{в2}' = 17{,}2° \text{ и } t_{в1}' = 16{,}3°.$$

При n 0,5

$$G_2' = 20{,}5 \text{ кг/час и } G_1' = 9{,}5 \text{ кг/час},$$

$$t_{22}' = 60{,}0 \text{ и } t_{21}' = 30{,}0°,$$

$$t_{в2}' = 15{,}8° \text{ и } t_{в1}' = 9{,}5°.$$

Все полученные в результате расчета данные нанесены на рис. 35, на котором для сравнения нанесены и кривые разрегулировки системы, изображенной на рис. 8, без установки у приборов шайб.

Рис. 35 показывает, что хотя гидравлическая устойчивость двухтрубных систем водяного отопления при установке шайб значительно повышается, тем не менее и в этом случае они не освобождаются полностью от влияния гравитационного напора.

В заключение следует определить для тех же расчетных условий влияние гравитационного напора в системе (рис. 8), рассчитанной на температурный перепад не в 25, а в 20°, например, на температуры 90° в подающих трубах и 70° в обратных.

В этом случае:

$$t_1 = t_1' = 90°, \quad t_2 = 70, \quad t_н = t_н' = -30°;$$

$$b = 124, \quad c = 48, \quad d = 20,$$

$$e = -13{,}64\,G \text{ и } f = 0{,}1G;$$

тогда уравнения (75) будут иметь следующие значения:

$$t_{22}' = \frac{90 \times (G_2' - 13{,}64G)}{G_2' + 0{,}10G},$$

и

$$t_{21}' = \frac{90 \times (2nG - G_2') - 13{,}64G}{2nG - G_2' + 0{,}10G}. \qquad (75')$$

При сопротивлении шайбы в 100 *мм вод. ст.* и расходе воды, равном

$$G = \frac{30 \times 25}{20} = 37{,}5 \text{ кг/час},$$

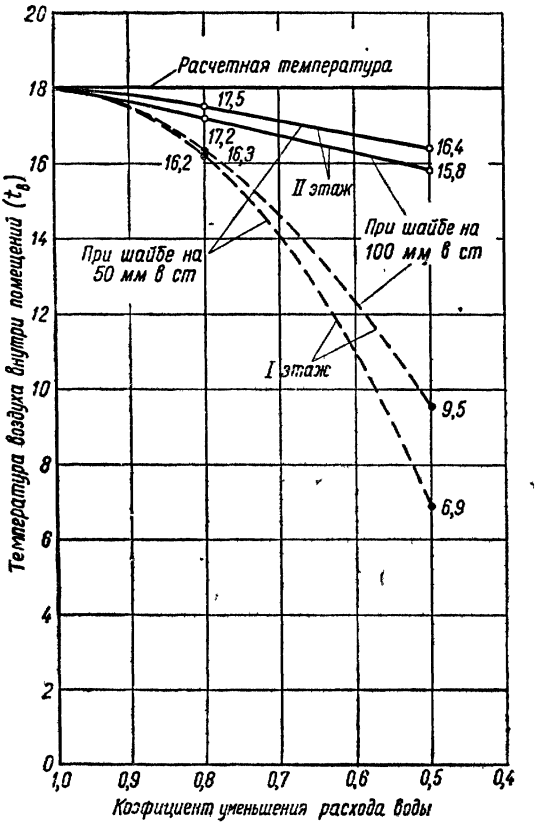


Рис. 35. Разрегулировка двухтрубной двухэтажной системы с нижней разводкой при установке шайб и уменьшении в ней расхода воды

уравнение (76) будет иметь следующее значение:

$$108{,}9 \times 10^{-3}\ G_2'^3 - 79{,}6 \times 10^{-3} \times \left(75n - G_2'\right)^2 + \\ + 2{,}2 \times \frac{90G_2' - 511{,}5}{G_2' + 3{,}75} - 0{,}15 \times \frac{90 \times \left(75n - G_2'\right) - 511{,}5}{75n - G_2' + 3{,}75} - 184{,}5 = 0.$$

При $n = 0{,}5$ (уменьшение расхода воды на 50%):

$$G_2' = 25 \text{ кг/час и } G_1' = 12{,}5 \text{ кг/час},$$

$$t'_{22} = 60{,}3^\circ \text{ и } t'_{21} = 37{,}8^\circ,$$

$$t'_{в2} = \frac{48 \times 90 + 48 \times 60{,}3 - 124 \times 30}{124 + 2 \times 48} = 15{,}8^\circ,$$

$$t'_{в1} = \frac{48 \times 90 + 48 \times 37{,}8 - 124 \times 30}{124 + 2 \times 48} = 10{,}9^\circ.$$

Полученный результат показывает, что перевод схемы (рис. 8) на расчетный перепад температур в 20° существенно не изменил внутренние температуры обоих этажей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

I. Построение температурных графиков

1. Температурные графики отопительных систем 5

II. Вертикальная разрегулировка двухтрубных систем

1. Охлаждение воды в трубах 18
2. Остаточные напоры при верхней разводке 21
3. Остаточные напоры при нижней разводке 45

III. Горизонтальная разрегулировка двухтрубных систем

1. Горизонтальная разрегулировка при верхней разводке 64
2. Горизонтальная разрегулировка при нижней разводке 77

IV. Эксплоатационная разрегулировка отопительных систем

1. Несоблюдение расчетных температур 86
2. Несоблюдение расчетных расходов воды 91
3. Гравитационная разрегулировка 104

V. Повышение тепловой и гидравлической устойчивости отопительных систем

1. Попутное движение воды 108
2. Увеличение расхода воды 121
3. Установка шайб сопротивления 129

Редактор *Л. Д. Богуславский.* Техн. редактор *О. А. Гурова*

Сдано в набор 15/VI 1950 г. Подписано к печати 23/XII 1950 г. Л-170911
Формат бумаги 60×92 1/16 Печ. л. 9,25. Уч.-изд. л. 9,55. Зн. в 1 п. л. 41000
Тираж 5000. Изд. № 646. Зак № 2408.

Типография № 2 Управления издательств и полиграфии Исполкома Ленгорсовета
Ленинград, Социалистическая, 14.