

ГЛАВА VII

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

§ VII.1. ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Гидравлическим режимом определяется взаимосвязь между расходом теплоносителя и давлением в различных точках системы в данный момент времени.

Расчетный гидравлический режим характеризуется распределением теплоносителя в соответствии с расчетной тепловой нагрузкой абонентов. Давление в узловых точках сети и на абонентских вводах равно расчетному. Наглядное представление об этом режиме дает пьезометрический график, построенный по данным гидравлического расчета.

Однако в процессе эксплуатации расход воды в системе изменяется. Переменный расход вызывается неравномерностью водопотребления на горячее водоснабжение, наличием местного количественного регулирования разнородной нагрузки, а также различными переключениями в сети. Изменение расхода воды и связанное с ним изменение давления приводят к нарушению как гидравлического, так и теплового режима абонентов. Расчет гидравлического режима дает возможность определить перераспределение расходов и давлений в сети и установить пределы допустимого изменения нагрузки, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию системы.

Гидравлические режимы разрабатываются для отопительного и летнего периодов времени. В открытых системах теплоснабжения дополнительно рассчитывается гидравлический режим при максимальном водоразборе из обратного и подающего трубопроводов. Расчет гидравлического режима базируется на основных уравнениях гидродинамики. В тепловых сетях, как правило, имеет место квадратичная зависимость падения давления ΔP (Па) от расхода:

$$\Delta P = SV \quad (\text{VII.1})$$

где S — характеристика сопротивления, представляющая собой падение давления при единице расхода теплоносителя, $\text{Па}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$; V — расход теплоносителя, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Значение характеристики сопротивления находится из совместного решения уравнений (VII.1), (VI.2), (VII.3):

$$5 \dots \frac{AP \wedge d(t+z)}{\dots} = \dots \quad (\text{VII.2})$$

$$L_s = 0,0894 \wedge \dots, \dots \quad (\text{VII.3})$$

где $z=3600$ с; A_g -постоянный коэффициент, зависящий от шероховатости стенок трубопроводов:

Эквивалентная шероховатость стенки трубы k_s , м	0,0002	0,0005	0,001
A_g , $\text{м}^{0,25} \cdot \text{ч}^2 / \text{с}^2$	$8,15 \cdot 10^{-10}$	$10,3 \cdot 10^{-10}$	$12,15 \cdot 10^{-10}$

Как следует из уравнения (VII.2) и (VII.3), характеристика сопротивления зависит от геометрических размеров сети, шероховатости стенок трубопроводов и плотности теплоносителя. При известных расходах и соответствующим им потерям давления характеристика сопротивления находится из уравнения (VII.1).

При разработке гидравлического режима часто используют линейную единицу давления, называемую напором.

Рис. VII.1. Характеристика тепловой сети и насоса:

1—расчетная характеристика; 2 — характеристика сети после отключения абонента; 3 — характеристика насоса

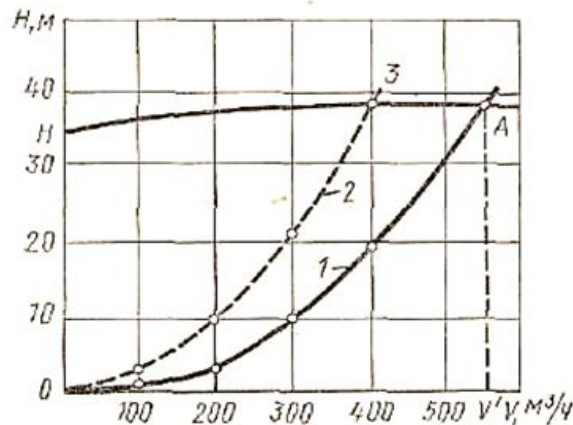
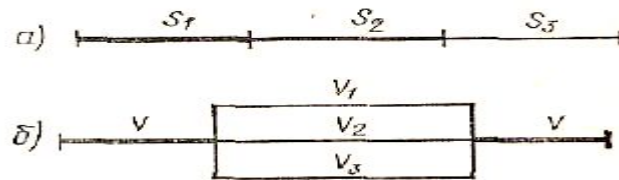


Рис. VII.2. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение участков



Графическое изображение потерь напора от расхода является характеристикой сети. Характеристика тепловой сети представляет собой квадратичную параболу, проходящую через начало координат (рис. VII.1). Пересечение характеристики сети с характеристикой насоса (точка *A*) определяет режим работы насоса на данную сеть.

В процессе эксплуатации характеристика сопротивления сети изменяется в связи с присоединением новых абонентов, отключением части нагрузки, при изменении шероховатости стенок трубопроводов.

Определим характеристику сопротивления разветвленной сети, состоящей из ряда последовательно и параллельно соединенных участков.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3, \quad (\text{VII.4})$$

Общие потери давления ΔP в сети, состоящей из последовательно соединенных участков с неизменным расходом V (рис. VII.2, а), складываются из потерь давления на каждом участке где ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 — потери давления на отдельных участках сети. Выразив потери давления через расход и характеристики сопротивления по формуле (VII. 1), получим

$$SV^2 = S_1V^2 + S_2V^2 + S_3V^2, \quad (\text{VII.5})$$

где s — характеристика сопротивления сети; S_1, S_2, S_3 — характеристики сопротивления ее составных участков. Отсюда следует

$$S = S_1 + S_2 + S_3. \quad (\text{VII.6})$$

Следовательно, суммарная характеристика сопротивления последовательно соединенных участков сети равна сумме характеристик сопротивления этих участков.

При параллельном соединении (рис. VII.2, б) общий расход в сети равен сумме расходов на ответвлениях

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (\text{VII.7})$$

Расход воды согласно выражению (VII. 1) может быть представлен в виде:

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P}{S}}; \quad V_1 = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{S_1}}; \quad V_2 = \sqrt{\frac{\Delta P_2}{S_2}}; \quad V_3 = \sqrt{\frac{\Delta P_3}{S_3}} \quad (\text{VII.8})$$

Ввиду равенства потерь давления в параллельно соединенных участках сети ($\Delta P = \Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3$) выражение (VII.7) примет вид:

$$\sqrt{\frac{1}{S}} = \sqrt{\frac{1}{S_1}} + \sqrt{\frac{1}{S_2}} + \sqrt{\frac{1}{S_3}} \quad (\text{VII.9})$$

Величина $1/\sqrt{S}$ представляет собой гидравлический показатель, называемый проводимостью, равный расходу воды при перепаде давления в 1 Па:

$$a = 1/\sqrt{S} = V/\sqrt{\Delta P} \quad (\text{VII.10})$$

С учетом зависимости (VII.10) получим:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 \quad (\text{VII.11})$$

где a —проводимость сети, a_1, a_2, a_3 —проводимости отдельных ее участков, $\text{м}^3/\text{ч} \cdot \text{Па}^{0.5}$.

Таким образом, суммарная проводимость параллельно соединенных участков равна сумме проводимостей этих участков.

На основе равенств (VII.6) и (VII.11) определяется характеристика сопротивления разветвленной сети по известным проводимостям или характеристикам сопротивления отдельных ее участков. С помощью полученных зависимостей производится расчет гидравлического режима системы.

§ VII.2. РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА

В автоматизированной системе с регуляторами РР для отопления и регуляторами температуры РТ для горячего водоснабжения расход воды у абонентов определяется только величиной их тепловой нагрузки. Постоянство заданного расхода на отопительном вводе поддерживается настройкой регулятора: при уменьшении располагаемого давления на вводе увеличивается степень открытия клапана регулятора.

Расчет гидравлического режима такой системы сводится к определению потерь давления при известных расходах воды.

В случае отсутствия на вводах авторегуляторов изменение расходов и давления в сети вызывает перераспределение расходов в магистральных трубопроводах и на абонентских вводах. Расчет гидравлического режима дает возможность определить расходы воды и соответствующие им потери давления при изменившихся условиях работы системы.

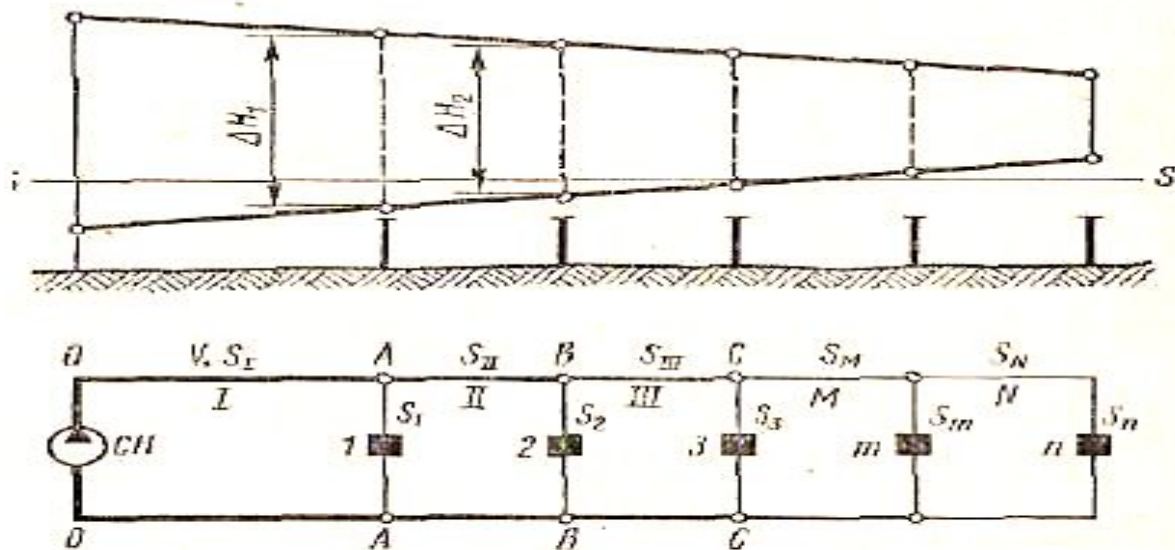


Рис. VII.3. Схема тепловой сети и пьезометрический график:
СН — сетевой насос

Исходными данными служат: схема сети, расчетный пьезометрический график и давление на коллекторах ТЭЦ. Рассмотрим схему тепловой сети, имеющей n абонентов (рис. VII.3). Характеристики сопротивления магистральных участков обозначим соответственно $S_I, S_{II}, S_{III}, \dots, S_N$, а характеристики сопротивления абонентов с учетом ответвлений — $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$. Суммарный расход воды в сети равен V , расход воды на абонентских вводах — V_i (с индексом, соответствующим его номеру).

Начиная с первого абонента, запишем условия равенства потерь давления в параллельных участках сети AS_1A и AS_nA :

$$\Delta P_1 = S_1 V_1^2 = S_{1-n} V^2, \quad (\text{VII.12})$$

где S_{1-n} — характеристика сопротивления сети от абонента 1 до n -го включительно со всеми ответвлениями, определяемая по формулам (VII.6) и (VII.И).

Из уравнения (VII.12) найдем относительный расход воды у абонента I;

$$V_1 = V_1/V = \sqrt{S_{1-n}/S_1}. \quad (\text{VII.13})$$

Для абонентского ввода 2 можно записать:

$$\Delta P_2 = S_2 V_2^2 = S_{2-n} (V - V_1)^2, \quad (\text{VII.14})$$

где S_{2-n} — суммарная характеристика сопротивления сети от абонента 2 до n -го включительно со всеми ответвлениями.

Но, с другой стороны, перепад давлений в узле A равен:

$$\Delta P_1 = (S_{11} + S_{2-n}) (V - V_1)^2 = S_{1-n} V^2. \quad (\text{VII.15})$$

Из совместного решения уравнений (VII.14) и (VII.15) найдем относительный расход воды у второго абонента:

$$\bar{V}_2 = \frac{V_2}{V} = \sqrt{\frac{S_{1-n}}{S_2} \frac{S_{2-n}}{S_{11-n}}}, \quad (\text{VII.16})$$

где $S_{II-n} = S_{II} - S_{2-n}$

По аналогии для любого m -го абонента системы, состоящей из n потребителей, получим:

$$\bar{V}_m = \frac{V_m}{V} = \sqrt{\frac{S_{1-n}}{S_m} \frac{S_{2-n}}{S_{II-n}} \frac{S_{3-n}}{S_{III-n}} \frac{S_{m-n}}{S_{M-n}}} \quad (VII.17)$$

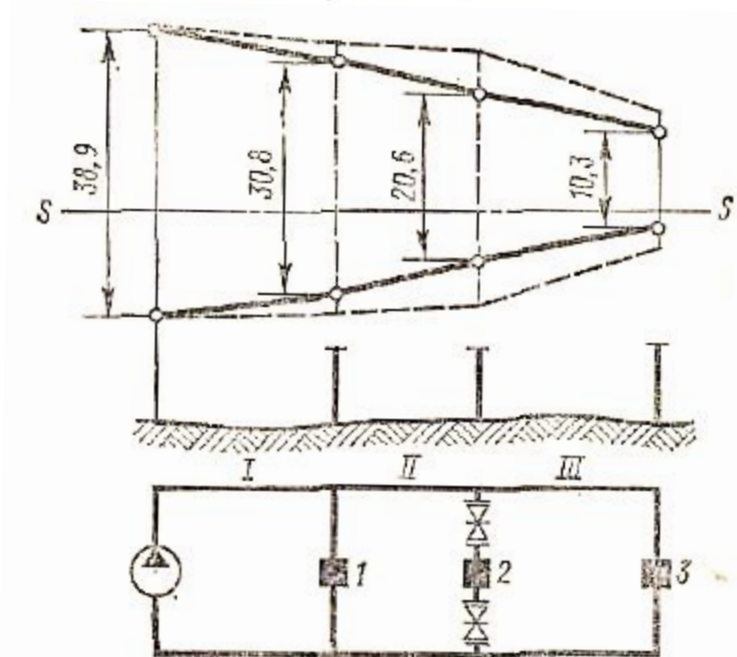


Рис. VII.4. Пьезометрические графики и принципиальная схема сети (к примеру 1):

— расчетный режим; - - - - пьезометрический график после отключения абонента 2

Таким образом, если известны суммарный расход воды и характеристики сопротивления отдельных участков сети, то можно найти расход воды через, любую абонентскую установку.

Пример 1. Схема тепловой сети и расчетный пьезометрический график, показаны на рис. VII.4. Расчетные, расходы воды и соответствующие им потери давления приведены в табл. VII.1.

Определить расходы воды и потери напора в сети при отключении абонента 2. Построить характеристику сети для расчетного и нерасчетного, режимов.

При расчете принять, что давление насоса остается постоянным к равным $372 \cdot 10^3$ Па. Плотность воды принимаем $\rho = 975$ кг/м³.

Решение. Расчетная характеристика сопротивления системы находится из формулы (VII.1) по данным, расчетного режима:

$$S = \Delta P / V^2 = 372 \cdot 10^3 / 565^2 = 1,16 \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{ч})^2.$$

Для построения характеристики сети задаемся расходами воды и определяем соответствующие им потери напора при $S = 1,16$. Характеристики сети и насоса показаны на рис. VII.1.

Определяем характеристики сопротивления магистральных участков сети *a* абонентов по известным расходам и потерям давления для расчетного режима по формуле (VII.1). Результаты расчета приведены в табл. VII.1.

Далее находим характеристики сопротивления и проводимости отдельных узлов системы после отключения абонента 2. Для этого суммируем характеристики сопротивления последовательно соединенных участков или проводимости параллельных участков.

Таблица VII.1 Расчет гидравлического режима тепловой сети (к примеру 1)

Наименование	Расчетный расход воды		Расчетные потери		Характеристика сопротивления, Па/(м ³ /ч) ²	Проводимость, м ³ /ч·Па ^{0,5}
	т/ч	м/ч	давления, Па · 10 ⁻³	напора, м		
Магистральный участок I	550	565	77,5	8,1	0,243	—
Магистральный участок II	300	308	97,5	10,2	1,03	—
Магистральный участок III	100	103	98,5	10,3	9,28	—
Абонент 1	250	256	294,6	30,8	4,5	0,475
Абонент 2	200	205	197,0	20,6	4,68	—
Абонент 3	100	103	98,5	10,3	9,28	—

Характеристика сопротивления магистральных участков II, III и абонента после отключения потребителя 2 составит:

$$S_{II-3} = S_{II} + S_{III} + S_3 = 1,03 + 9,28 + 9,28 = 19,6.$$

Проводимость участков II—3

$$a_{II-3} = \frac{1}{\sqrt{S_{II-3}}} = \frac{1}{\sqrt{19,6}} = 0,226.$$

Суммарная проводимость участков II—3 и абонента 1

$$a_{1-3} = a_{II-3} + a_1 = 0,226 + 0,475 = 0,701.$$

Общая характеристика сопротивления этих участков сети составляет:

$$S_{1-3} = \frac{1}{a_{1-3}^2} = \frac{1}{0,701^2} = 2,07.$$

Суммарная характеристика сопротивления всей системы после отключения абонента 2 равна

$$S = S_1 + S_{1-3} = 0,243 + 2,07 = 2,313.$$

Как видно из приведенного расчета, характеристика сопротивления системы при отключении параллельного участка увеличивается.

Характеристика сети после отключения абонента 2 построена по зависимости (VII. 1) при $S=2,313$ (см. рис. VII.1)

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P}{S}} = \sqrt{\frac{372000}{2,313}} = 401 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход воды у абонента I определим по формуле (VII.13)

$$V_1 = V \sqrt{\frac{S_{1-3}}{S_1}} = 401 \sqrt{\frac{2,07}{4,5}} = 272 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход воды у абонента 3

$$V_3 = V - V_1 = 401 - 272 = 129 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Потери давления и напора на участках сети:

$$\Delta P_I = S_I V^2 = 0,243 \cdot 401^2 = 39\,070 \text{ Па};$$

$$\Delta H_I = \frac{\Delta P_I}{9,81\rho} = \frac{39\,070}{9,81 \cdot 975} = 4,09 \text{ м};$$

$$\Delta P_{II} = S_{II} V_3^2 = 1,03 \cdot 129^2 = 17\,140 \text{ Па};$$

$$\Delta H_{II} = \frac{17\,140}{9,81 \cdot 975} = 1,79 \text{ м};$$

$$\Delta P_{III} = 9,28 \cdot 129^2 = 154\,430 \text{ Па};$$

$$\Delta H_{III} = \frac{154\,430}{9,81 \cdot 975} = 16,1 \text{ м}.$$

Располагаемые напоры в узловых точках равны:

$$\Delta H_1 = H_H - \Delta H_I = 38,9 - 4,09 = 34,81 \text{ м};$$

$$\Delta H_2 = 34,81 - 1,79 = 33,02 \text{ м};$$

$$\Delta H_3 = 33,02 - 16,1 = 16,98 \text{ м}.$$

По найденным величинам строим пьезометрический график для нового режима (рис. VII.4).

На основе расчета гидравлического режима решается целый ряд вопросов, связанных с эксплуатацией системы теплоснабжения, а именно: возможность присоединения новых абонентов к существующей сети, аварийное резервирование системы, проверяется работа сети при максимальном водоразборе на горячее водоснабжение. Методы ручного счета весьма трудоемки, а в ряде случаев, например для многокольцевых сетей, практически неприемлемы.

ВТИ разработаны алгоритмы и программы расчета гидравлических режимов тепловых сетей на ЭЦВМ. С их помощью решены многочисленные задачи по расчету и исследованию гидравлических режимов систем теплоснабжения ряда городов страны.

§ VII.3. ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Под гидравлической устойчивостью понимают способность системы сохранять постоянный расход теплоносителя на абонентских вводах при изменении условий работы других потребителей. Гидравлическая устойчивость количественно оценивается коэффициентом гидравлической устойчивости

$$Y = V' / V_{\max},$$

где V' , V_{\max} — соответственно расчетный и максимально возможный расход сетевой воды на абонентском вводе.

Коэффициент гидравлической устойчивости $Y=1$ может быть в принципе достигнут установкой на вводах регуляторов расхода, автоматически обеспечивающих постоянство расхода воды в абонентских системах. В реальных условиях эксплуатации $Y \neq 1$, в неавтоматизированной системе любые переключения в сети изменяют расходы воды у абонентов. Так, например, при отключении части нагрузки расход воды в тепловой сети уменьшается, что приводит к снижению потерь давления в сети и к росту рас полагаемых давлений на вводах. Расход воды у оставшихся абонентов возрастает. Отклонение фактического расхода от расчетной величины вызывает гидравлическую разрегулировку абонентских систем. Максимальная разрегулировка абонентской системы произойдет в том случае, когда останется включенным только один потребитель. Падение давления в сети при этом будет настолько незначительным, что, пренебрегая им, можно принять располагаемый перепад давлений на вводе равным расчетному давлению сетевого насоса. Тогда, заменив в равенстве (VII. 18) отношение расходов воды отношением потерь давления, получим

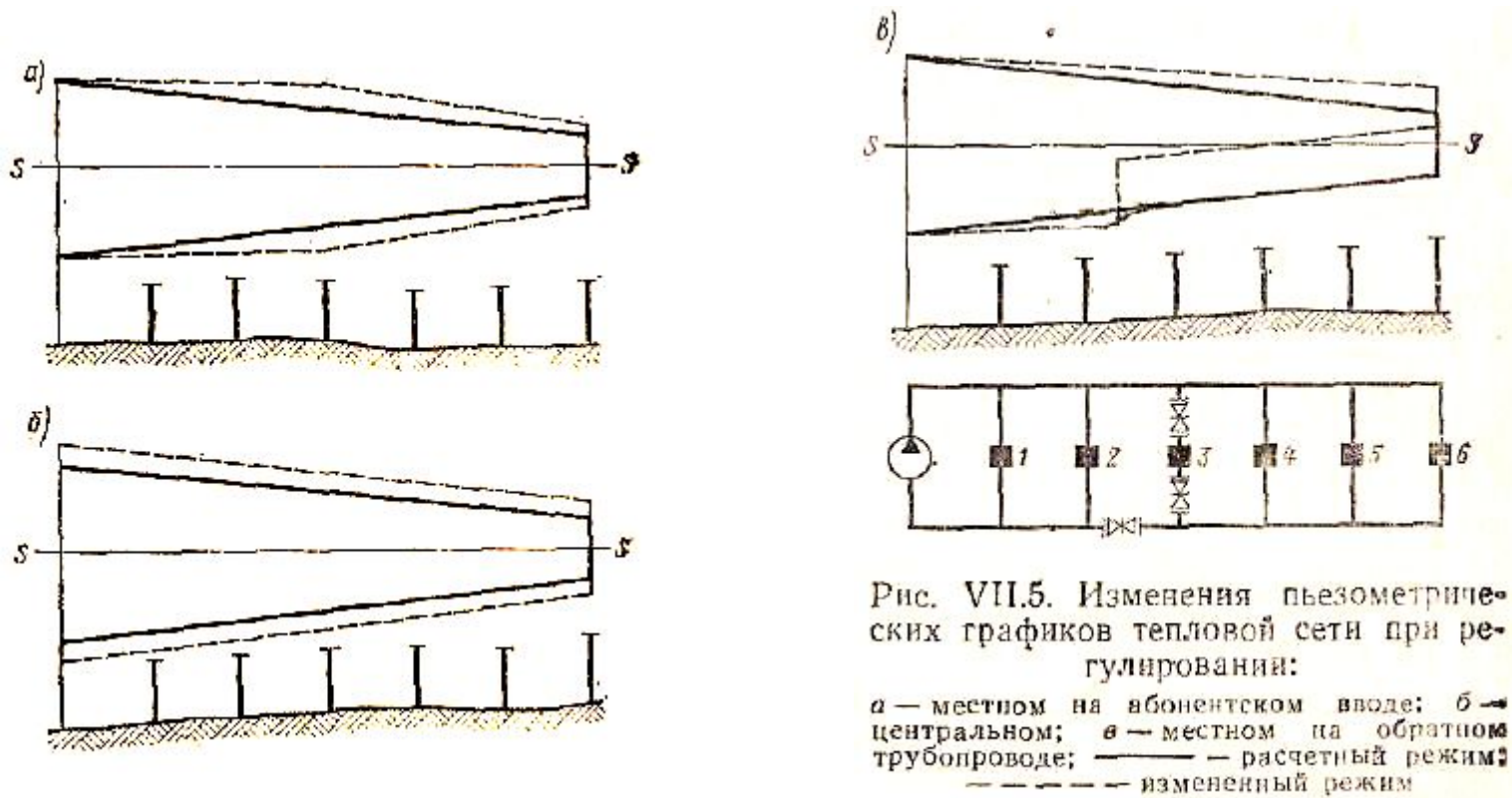
$$Y = \frac{V'}{V_{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{аб}}{P_{н}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{аб}}{\Delta P_{аб} + \Delta P_{с}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta P_{с}}{\Delta P_{аб}}}}, \quad (\text{VII. 19})$$

где $\Delta P_{аб}$ — располагаемое давление на вводе при расчетном расходе воды; $\Delta P_{с}$ — потери давления в сети при расчетном режиме; $P_{н} = \Delta P_{аб} + \Delta P_{с}$ — давление сетевого насоса.

Из выражения (VII.19) следует, что гидравлическая устойчивость системы повышается с уменьшением потерь давления в магистральных сетях и с увеличением гидравлического сопротивления абонентских установок. С этой целью целесообразно уменьшение диаметров вводов, установка на вводах дроссельных шайб. Задвижки на магистральных трубопроводах должны быть полностью открыты.

Некоторые случаи разрегулировки сети приведены на рис. VII.5.

При частичном прикрытии запорной арматуры на вводе в здание или полном отключении абонента характеристика сопротивления сети увеличивается, что приводит к снижению общего расхода воды в системе. Потери давления на участке от источника теплоснабжения до отключенного абонента Σ уменьшаются, в результате чего возрастают давления на вводах (рис. VII, 5, *a*). Расход воды у всех оставшихся абонентов возрастает. Такая разрегулировка, когда знак изменения расходов у всех абонентов одинаков,



называется соответственной. Для количественной оценки разрегулировки сопоставим расходы воды у абонентов. Отношение расходов у абонентов 4 и 6 из уравнения (VII.17) составляет:

$$\frac{V_4}{V_6} = \sqrt{\frac{S_8}{S_4} \frac{S_{V-6}}{S_{5-6}}}. \quad (\text{VII.20})$$

Как следует из выражения (VI 1.20), отношение расходов воды, зависит только от характеристики сопротивления сети на участках от абонента 4 до конечной точки сети. Поэтому при изменении характеристики сопротивления на каком-либо участке сети у всех абонентов, расположенных между этим участком и концевой точкой сети, степень изменения расхода одинакова. Такая разрегулировка называется пропорциональной. Она имеет место у абонентов 4, 5, 6. У абонентов, расположенных между источником теплоснабжения и местом изменения сопротивления, происходит непропорциональная разрегулировка, причем чем ближе абонент расположен к источнику теплоснабжения, тем меньше изменение перепада давлений и, следовательно, расхода. Ближайшие к ТЭЦ абоненты обладают, как правило, большей гидравлической устойчивостью.

Увеличение давления сетевого насоса (рис. VII. 5) при неизменной характеристике сопротивления сети приводит к пропорциональному росту располагаемых давлений на вводах. В системе происходит соответственная пропорциональная разрегулировка.

Если частично прикрыть задвижку на магистральном трубопроводе, то общий расход воды в системе сократится. Однако изменение расходов воды у абонентов будет неодинаковым. Так частичноекрытие задвижки на обратной магистрали (рис. VII.5, б) сокращает расход сетевой воды и потери давления в сети. Располагаемые давления на вводах абонентов, расположенных между источником теплоснабжения и задвижкой, увеличиваются. Поэтому расходы воды у абонентов 1 и 2 возрастают. Повышение давления в обратной магистрали перед задвижкой приводит к уменьшению располагаемых давлений у абонентов, находящихся перед задвижкой. Расходы воды в абонентских системах 3—6 уменьшаются. В системе происходит несоответственная разрегулировка, при которой знак изменения расходов у абонентов неодинаков.

Приведенные примеры показывают большое разнообразие возможных изменений гидравлического режима в зависимости от условий эксплуатации системы.

§ VII.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Для обеспечения надежной работы тепловой сети и абонентских установок необходимо ограничить изменение давления в системе допустимыми пределами. При этом особое значение имеет режим подпитки и изменение давления в обратной магистрали. Повышение давления в обратном трубопроводе может вызвать недопустимый рост давлений в отопительных системах, присоединенных по зависимым схемам. Падение давления приводит к опорожнению верхних точек местных систем и к нарушению циркуляции в них.

Для ограничения колебаний давления в системе в одной, а при сложном рельефе местности в нескольких точках сети изменяют давление в зависимости от режима работы системы. Такие точки называются точками регулируемого давления. В тех случаях, когда по условиям работы системы давление в этих точках поддерживается постоянным как при статическом, так и при динамическом режимах, они называются нейтральными. Постоянное давление в нейтральной точке поддерживается автоматически подпиточным устройством.

В небольших по протяженности сетях, когда статическое давление может быть равно давлению у всасывающего патрубка сетевого насоса, нейтральная точка O устанавливается у всасывающего патрубка сетевого насоса (рис. VII.6). Давление подпиточного насоса, выбранное из условия заполнения системы водой, сохраняется неизменным и при динамическом режиме, что обеспечивает наиболее простую схему подпиточного устройства.

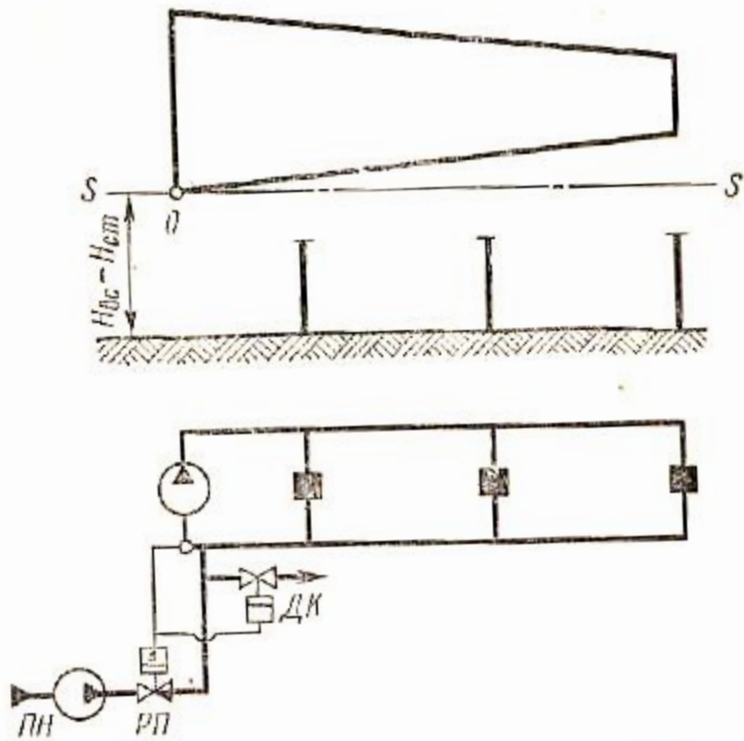


Рис. VII.6. Пьезометрический график и схема подпитки сетки с нейтральной точкой у всасывающего патрубка сетевого насоса:
 РП — регулятор подпитки; ДК — дренажный клапан

В разветвленных тепловых сетях (рис. VII.7) закрепление нейтральной точки на одной из магистралей не обеспечивает необходимой устойчивости гидравлического режима. Допустим, что нейтральная точка O закреплена на обратной магистрали района II (график 1). При сокращении расхода воды в сетях этого района потери давления в трубопроводах уменьшаются, что при постоянном давлении в точке O приводит к росту давления у всасывающего патрубка сетевого насоса и к соответствующему повышению давления в магистралях района I (график 2). При прекращении циркуляции в сети района II давление во всасывающем патрубке сетевого насоса повысится до статического. Это приведет к дальнейшему росту давления во всех точках системы района I (график 3) и может быть причиной аварий в абонентских системах.

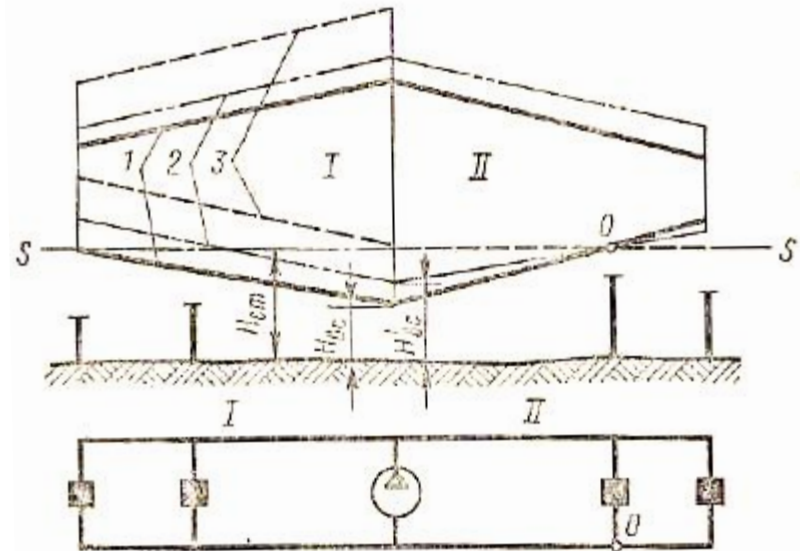


Рис. VII.7. Пьезометрические графики разветвленной сети с нейтральной точкой на одной из магистралей

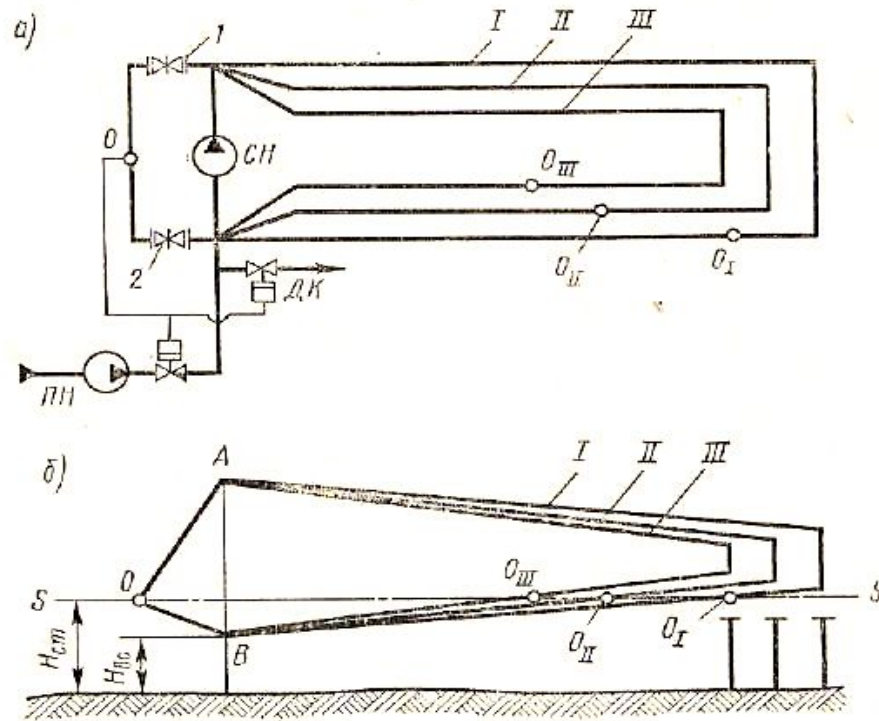


Рис. VII.8. Пьезометрический график и схема подпитки сети с нейтральной точкой на перемычке сетевого насоса: AOB — пьезометрический график перемычки; I, II, III — пьезометрические графики соответственно районов I, II, III .

Поэтому нейтральную точку не следует размещать ни на одной из работающих магистралей. Закрепление нейтральной точки должно быть сделано на специально выполненной перемычке у сетевого насоса. Во время работы насоса в перемычке происходит циркуляция воды. Падение давления в перемычке равно падению давления в сети (рис. VII.8,а). Давление в нейтральной точке используется в качестве импульса, регулирующего величину подпитки.

При падении давления в системе и понижении давления в точке O увеличивается открытие регулятора подпитки $РП$ и возрастает подача воды подпиточным насосом. С ростом давления в сети, например, при повышении температуры сетевой воды, давление в нейтральной точке возрастает, и клапан $РП$ прикрывается, уменьшая подачу воды. Если после закрытия клапана $РП$ давление продолжает расти, то дренажный клапан $ДК$ сливает часть воды, и давление восстанавливается.

Регулирование давления в сети можно осуществить с помощью регулировочных вентилей 1 и 2 на перемычке насоса (рис. VII.8, а). Так, частичное закрытие вентиля 1 увеличивает давление у всасывающего патрубка сетевого насоса, что приводит к росту давления в сети. При полностью закрытом вентиле 1 циркуляция в перемычке прекращается, и давление у всасывающего патрубка H_{bc} становится равным давлению в точке О. Давление в системе возрастает. Пьезометрический график перемещается вверх параллельно самому себе и занимает предельно высокое положение (рис. VII.9, график 2). Если закрыт регулировочный вентиль 2 (см. рис. VII.8), то давление на нагнетательном патрубке сетевого насоса становится равным давлению в нейтральной точке. Пьезометрический график переместится вниз до предельно низкого положения (график 3).

При сложном рельефе местности с большой разностью геодезических отметок или в случае присоединения группы зданий повышенной этажности не всегда представляется возможным принять одну величину гидростатического давления для всех абонентов. В этих условиях необходимо разделить систему на зоны с независимым гидравлическим режимом (рис. VII.10). Основная нейтральная точка О

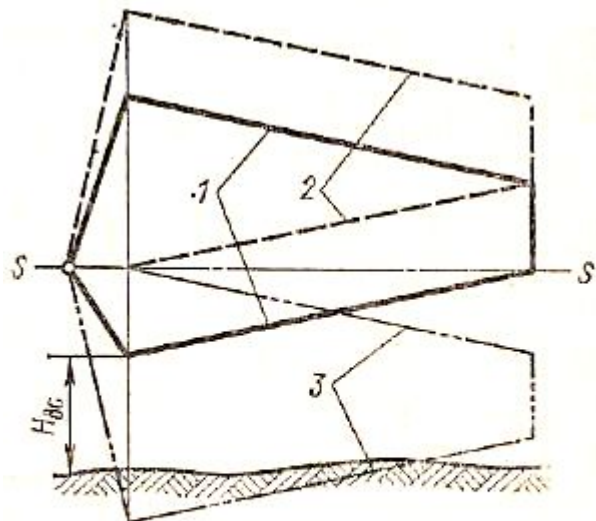


Рис. VII.9. Изменения пьезометрических графиков при регулировании давления на перемычке сетевого насоса

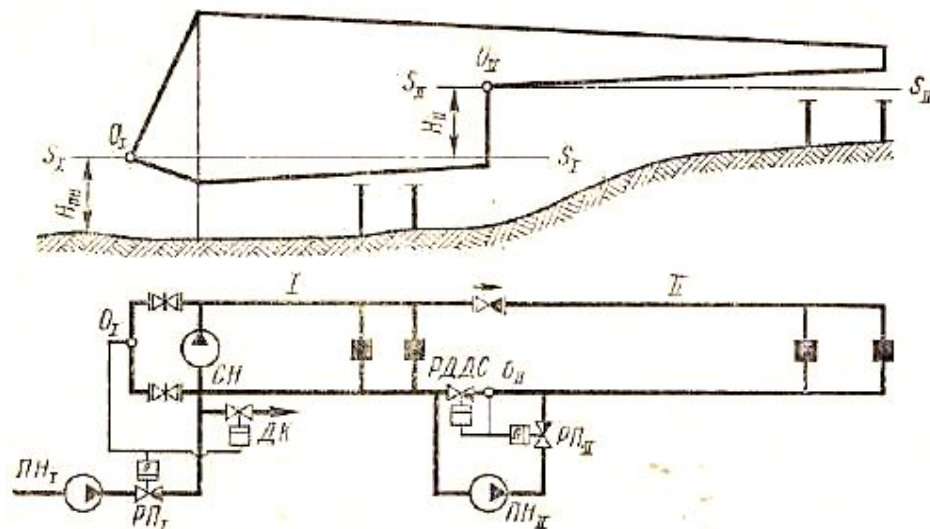


Рис. VII.10. Пьезометрический график и схема тепловой сети с двумя нейтральными точками

закрепляется на перемычке сетевого насоса $СН$. Статическое давление $S_I — S_I$ придерживается автоматически регулятором подпитки $РП_I$ и подпиточным насосом $ПН_I$. Дополнительная нейтральная точка O_{II} размещается на обратной линии в зоне II. Постоянное давление в ней поддерживается с помощью регулятора давления «до себя» $РДДС$. В случае прекращения циркуляции в сети и падения давления в верхней зоне $РДДС$ закрывается, одновременно закрывается и обратный клапан $ОК$, установленный на подающей линии. Благодаря этому верхняя зона гидравлически изолируется от нижней. Подпитка верхней зоны осуществляется с помощью подпиточного насоса $ПН_{II}$ и регулятора подпитки $РП_{II}$ по импульсу давлений в точке O_{III} .

§ VII.5. ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Гидравлический режим систем теплоснабжения в значительной степени зависит от нагрузки горячего водоснабжения. Суточная неравномерность водопотребления, а также сезонное изменение расхода сетевой воды на горячее водоснабжение существенно изменяют гидравлический режим системы.

При отсутствии регуляторов расхода переменная нагрузка горячего водоснабжения вызывает изменение расходов воды как в тепловой сети, так и в отопительных системах, особенно на концевых участках сети.

Центральное регулирование гидравлическим режимом в таких случаях возможно лишь при обеспечении одинаковой степени изменения расхода воды на отопление у всех потребителей. Исследованиями доказано, что для пропорциональной разрегулировки отопительных систем должны быть выполнены следующие условия:

1) отношение расчетных расходов воды на горячее водоснабжение и отопление должно быть одинаково у всех абонентов при одинаковом суточном графике водопотребления;

2) при начальной регулировке системы, производимой при расчетном расходе воды на вводах, у всех абонентов устанавливаются одинаковые полные давления в подающей линии перед элеватором $H_{пз}$ и в обратном трубопроводе после отопительной системы $H_{оз}$.

Для гашения избыточных напоров в узлах ввода должны быть установлены дроссельные шайбы на подающем и обратном трубопроводах. Ввиду этого перепады напоров на всех вводах одинаковы. Гидравлический режим такой системы (рис. VII.11) эквивалентен режиму тепловой сети с одним эквивалентным абонентом, у которого расчетные расходы на вводе равны суммарным расходам в реальной сети.

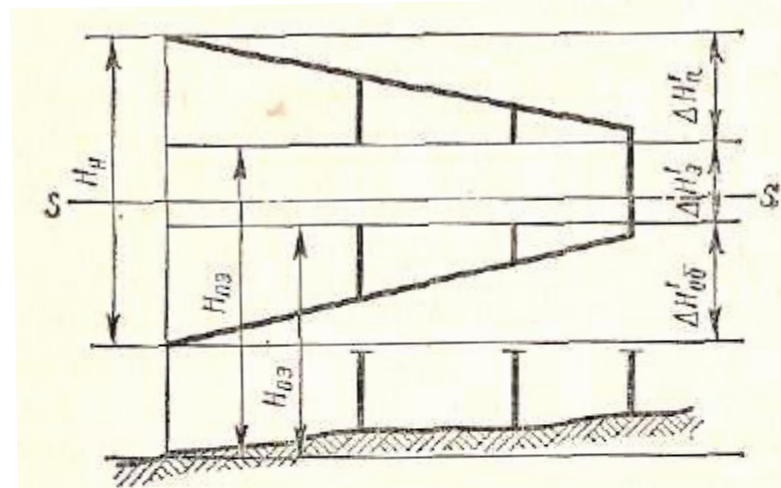


Рис. VII.11. Пьезометрический график тепловой сети при пропорциональной разрегулировке абонентов:

H_n — напор насоса; $\Delta H_{\text{п}}$ — потери напора в подающем трубопроводе; $\Delta H_{\text{э}}$ — потери напора в абонентском узле ввода; $\Delta H_{\text{об}}$ — потери напора в обратном трубопроводе; $H_{\text{пз}}$ — полный напор в подающей линии; $H_{\text{оз}}$ — полный напор в обратной линии

Установим зависимость расхода сетевой воды на отопление от режима водопотребления. Для расчетного режима потери давления в системе равны

при изменении расчет

$$P'_n = \Delta P'_п + \Delta P'_э + \Delta P'_об; \quad (\text{VII.21})$$

$$P_n = \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{об}}, \quad (\text{VII.22})$$

Где $P'_н$ — расчетное давление насоса; $\Delta P'_п, \Delta P'_з, \Delta P'_{об}$ — расчетные потери давления соответственно в подающей магистрали, абонентском узле ввода и в обратном трубопроводе тепловой сети; $P_н, \Delta P_п, \Delta P_з, \Delta P_{об}$ — те же величины при нерасчетных условиях.

В **закрытой системе** теплоснабжения расчетный расход воды в сетях определяют по сумме расчетных расходов на отопление и горячее водоснабжение. Выразим потери давления через отношение расходов воды при нерасчетном и расчетном режимах. С учетом квадратичной зависимости потерь давления от расхода уравнение (VII.22) примет вид

$$P'_н = \Delta P'_п \left(\frac{V_о + V_г}{V'_о + V_{п.г}} \right)^2 + \Delta P'_з \left(\frac{V_о}{V'_о} \right)^2 + \Delta P'_{об} \left(\frac{V_о + V_г}{V'_о + V_{п.г}} \right)^2, \quad (VII.23)$$

где $V'_о, V'_{п.г}$ — расчетные расходы сетевой воды соответственно на отопление и горячее водоснабжение; $V_о, V_г$ — расходы сетевой воды на отопление и горячей водоснабжение при нерасчетных условиях.

Обозначим: $\varphi = V_о / V'_о$ — относительный расход воды на отопление, равный отношению фактического расхода $V_о$ к расчетному $V'_о$; $n = V_г / V'_о$ — относительный расход сетевой воды на горячее водоснабжение; $n_p = V_{п.г} / V'_о$ — расчетный относительный расход воды на горячее водоснабжение, равный отношению расчетного расхода сетевой воды на горячее водоснабжение к расчетному отопительному расходу воды.

После алгебраических преобразований с учетом принятых обозначений уравнение (VII.23) запишется в виде

$$\frac{P'_н}{P'_н} = \overline{\Delta P}_п \left(\frac{\varphi + n}{1 + n_p} \right)^2 + \overline{\Delta P}_з \varphi^2 + \overline{\Delta P}_{об} \left(\frac{\varphi + n}{1 + n_p} \right)^2, \quad (VII.24)$$

где $\overline{\Delta P}_п = \Delta P'_п / P'_н$; $\overline{\Delta P}_{об} = \Delta P'_{об} / P'_н$; $\overline{\Delta P}_з = \Delta P'_з / P'_н$ — относительные потери давления соответственно в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети и в абонентском узле ввода.

При равенстве расходов и потерь давления в подающем и обратном трубопроводах уравнение (VII.24) упрощается:

$$\frac{P'_н}{P'_н} = 2 \overline{\Delta P}_п \left(\frac{\varphi + n}{1 + n_p} \right)^2 + \overline{\Delta P}_з \varphi^2. \quad (VII.25)$$

Отсюда относительный расход воды на отопление составит:

$$\varphi = \frac{-2\Delta\bar{P}_n n + (1+n_p) \sqrt{2\Delta\bar{P}_n \alpha + \Delta\bar{P}_s (1+n_p)^2 \alpha - 2\Delta\bar{P}_n \Delta\bar{P}_s n^2}}{2\Delta\bar{P}_n + (1+n_p)^2 \Delta\bar{P}_s}, \quad (\text{VII.26})$$

где $a = P_n / P'_n$.

Изменение относительного расхода воды на отопление в зависимости от нагрузки горячего водоснабжения n для различных соотношений потерь давления в магистральных трубопроводах и на абонентском вводе показано на рис. VII.12. Из уравнения (VII.26) и рис. VII.12 следует, что при постоянном давлении сетевого насоса относительный расход воды на отопление возрастает

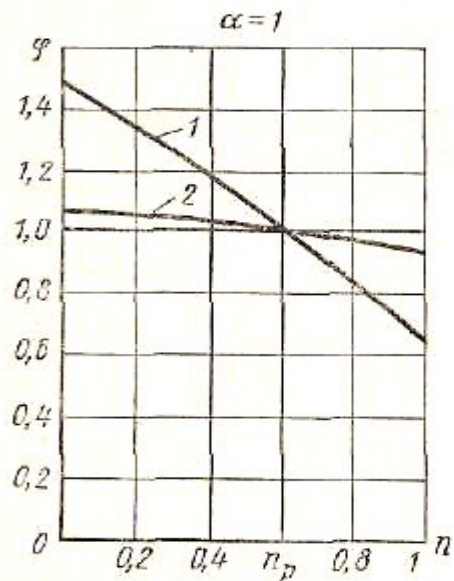


Рис. VII.12. Зависимость относительного расхода воды на отопление от нагрузки горячего водоснабжения в закрытой системе теплоснабжения ($Q_{\text{ср.т.}}/Q'_0 = 0,3$; $n_p = 0,6$):

1 — при низкой гидравлической устойчивости ($Y = 0,32$); 2 — при высокой гидравлической устойчивости ($Y = 0,95$)

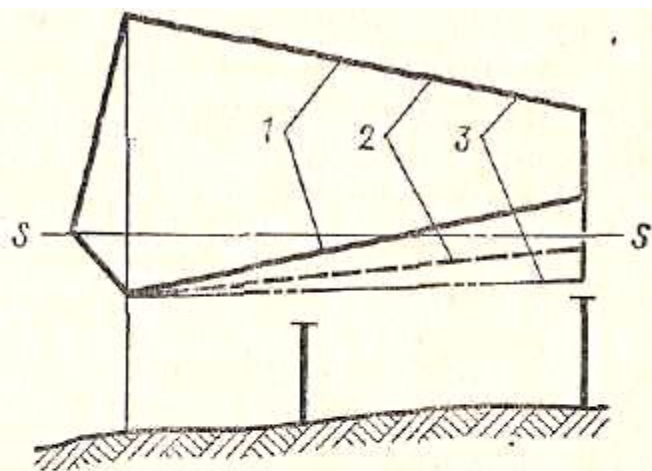


Рис. VII.13. Пьезометрический график открытой системы теплоснабжения при связанном регулировании на вводе:

1 — водоразбор отсутствует; 2 — среднечасовой водоразбор; 3 — максимальный водоразбор

по мере сокращения нагрузки горячего водоснабжения, причем это изменение тем больше, чем ниже гидравлическая устойчивость сети. Увеличение расхода воды на отопление приводит к перерасходу тепла. Наиболее значительные колебания расхода сетевой воды происходят при параллельной схеме присоединения подогревателей горячего водоснабжения. Для двухступенчатой смешанной схемы включения водоподогревателей влияние нагрузки горячего водоснабжения уменьшается за счет сокращения расчетного расхода воды на горячее водоснабжение.

В **открытых системах** теплоснабжения гидравлический режим зависит как от величины, так и от места водоразбора.

При установке на абонентских вводах регуляторов расхода PP по принципу связанного регулирования (см. рис. IV. 19) расход воды в подающем трубопроводе поддерживается постоянным при любой величине водоразбора. Расход воды и давление в обратном трубопроводе будут зависеть лишь от нагрузки горячего водоснабжения. С ростом водоразбора уменьшается расход воды в обратном трубопроводе, вследствие чего снижаются и потери давления в нем (рис. VII. 13).

При отсутствии регуляторов расхода водоразбор, отличающийся от расчетного, вызывает изменение расходов воды в магистральных трубопроводах и в отопительных системах. Водоразбор из обратной линии увеличивает располагаемые давления в сети за счет уменьшения потерь давления в обратном трубопроводе (рис. VII. 14). Рост располагаемых давлений на вводах, в свою очередь, несколько повышает расход сетевой воды в отопительных системах и в подающем трубопроводе.

Для оценки количественного влияния водоразбора на гидравлический режим открытой системы воспользуемся уравнениями (VII.21) и (VII.22). Примем, что расчетные условия соответствуют расходу воды в подающем и обратном трубопроводе при температуре наружного воздуха в точке излома температурного графика $t''_н$ (см. рис. IV.24). Потери давления при нерасчетном водоразборе определяем из уравнения

$$P_H = \Delta P'_n \left(\frac{V'_o + V_r \beta}{V'_o + V_{p.r}} \right)^2 + \Delta P'_z \left(\frac{V_o}{V'_o} \right)^2 + \Delta P'_{об} \left[\frac{V_o - (1 - \beta) V_r}{V'_o} \right]^2, \quad (VII.27)$$

где $V_{p.г}$ — расчетный расход воды на горячее водоснабжение; β — доля водоразбора на горячее водоснабжение из подающего трубопровода.

С учетом ранее принятых обозначений выражение (VII.27) может быть преобразовано к виду

$$\frac{P_{н}}{P'_{н}} = \overline{\Delta P}_{п} \left(\frac{\varphi + \beta n}{1 + n_p} \right)^2 + \overline{\Delta P}_{г} \varphi^2 + \overline{\Delta P}_{об} [\varphi - (1 - \beta) n]^2. \quad (\text{VII.28})$$

Из уравнения (VII.28) определяется относительный расход воды на отопление φ в зависимости от величины и места водоразбора при заданном давлении насоса.

Влияние водоразбора на гидравлический режим тем больше, чем ниже гидравлическая устойчивость системы (рис. VII.15). Как видно из графиков, расход воды на отопление практически не зависит от величины водоразбора при $\beta = 0,5$. Поэтому для уменьшения влияния горячего водоснабжения целесообразно производить наладку системы при частичном водоразборе из подающего и обратного трубопроводов.

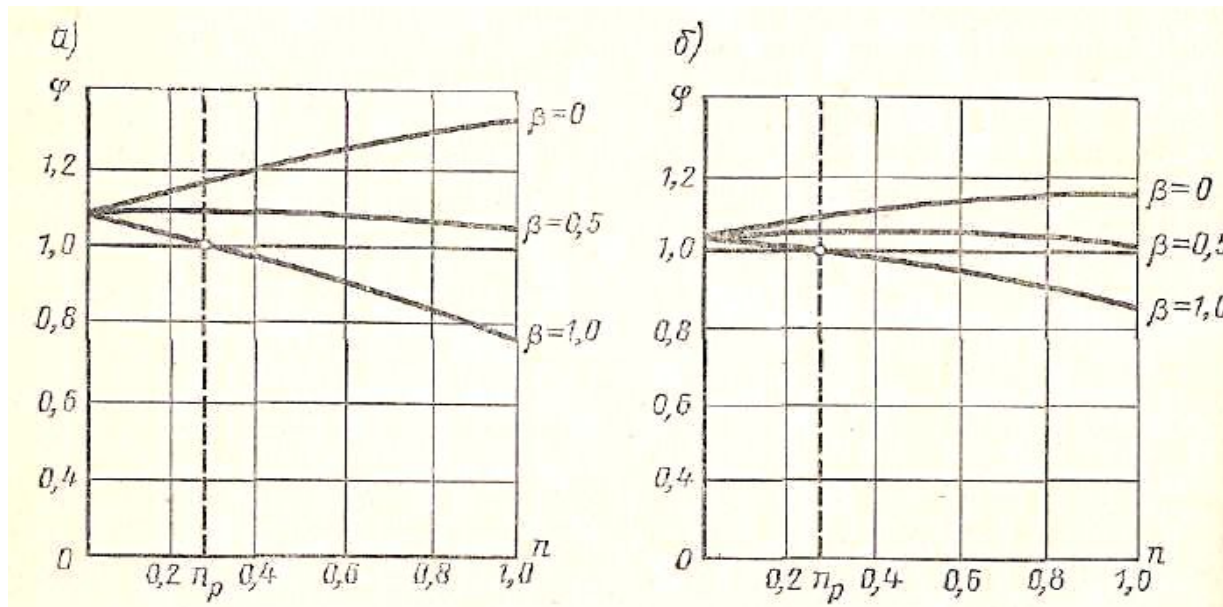


Рис. VII.15. Изменение относительного расхода воды на отопление в открытой системе теплоснабжения в зависимости от величины и места водоразбора ($n_p = 0,27$):

а — низкая гидравлическая устойчивость; б — высокая гидравлическая устойчивость

Поскольку значения пир зависят от величины водопотребления и температуры воды в сети, постоянный расход воды в отопительных установках ($\phi=1$) может быть поддержан только изменением давления насоса.

Из уравнения (VII.28) при $\phi=1$ следует

$$\frac{P_{\text{н}}}{P'_{\text{н}}} = \overline{\Delta P}_{\text{п}} \left(\frac{1+\beta n}{1+n_{\text{п}}} \right)^2 + \overline{\Delta P}_{\text{г}} + \overline{\Delta P}_{\text{об}} [1 - (1-\beta)n]^2, \quad (\text{VII.29})$$

В частном случае при водоразборе из обратной магистрали ($\beta=0$) давление насоса должно снижаться пропорционально росту нагрузки горячего водоснабжения:

$$\frac{P_{\text{н}}}{P'_{\text{н}}} = \overline{\Delta P}_{\text{п}} \left(\frac{1}{1+n_{\text{п}}} \right)^2 + \overline{\Delta P}_{\text{г}} + \overline{\Delta P}_{\text{об}} (1-n)^2. \quad (\text{VII.30})$$

При отсутствии водоразбора давление насоса должно быть равно:

$$\frac{P_{\text{н}}}{P'_{\text{н}}} = \overline{\Delta P}_{\text{п}} \left(\frac{1}{1+n_{\text{п}}} \right)^2 + \overline{\Delta P}_{\text{г}} + \overline{\Delta P}_{\text{об}}. \quad (\text{VII.31})$$

Пример 2. Определить расходы воды и потери давления в открытой системе теплоснабжения при максимально часовом водоразборе из обратного трубопровода. Расходы воды на отопление и горячее водоснабжение у всех абонентов одинаковы и равны: $V'_0 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$, $V_{\text{ср.г}} = 45 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q_{\text{ср.г}}/Q'_0 = 0.31$). Коэффициент часовой неравномерности $k=2$. Схема системы и расчетный пьезометрический график приведены на рис. VII.14. При расчете принять, что напор насоса постоянен и равен $H_{\text{н}}=34.3 \text{ м}$.

Решение. Расчетные расходы воды и подающем и обратном трубопроводах равны:

$$V_{\text{р.п}} = V'_0 + V_{\text{р.г}} = V'_0 + 0,6V_{\text{ср.г}} = 3 \cdot 100 + 0,6 \cdot 3 \cdot 45 = 381 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$V_{\text{р.об}} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Определим относительные расходы воды на горячее водоснабжение. При расчетных условиях

$$n_{\text{п}} = V_{\text{р.г}}/V'_0 = 81/300 = 0,27;$$

при максимальном водозаборе

$$n = kV_{\text{ср.г}}/V'_0 = 0,9.$$

Относительные потери напора составят:

$$\overline{\Delta H_n} = \Delta H_n^0 / H_n = 15 / 34,3 = 0,44; \quad \overline{\Delta H_{об}} = \Delta H_{об}^0 / H_n = 9,3 / 34,3 = 0,27;$$

$$\overline{\Delta H_p} = 10 / 34,3 = 0,29.$$

Подставив полученные значения в формулу (VII.28) при $\beta=0$ и $n=0,9$, получим

$$1 = 0,44 \left(\frac{\varphi}{1 + 0,27} \right)^2 + 0,29 \varphi^2 + 0,27 (\varphi - 0,9)^2.$$

Отсюда $\varphi=3$.

Расход воды на отопление у абонента составит:

$$V_o = \varphi V' = 3 \cdot 100 = 300 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Потери напора при максимальном часовом водоразборе равны:

$$\Delta H_n = \Delta H_n^0 \left(\frac{V_o}{V_{p,n}} \right)^2 = 15 \left(\frac{3 \cdot 130}{381} \right)^2 = 15,6 \text{ м};$$

$$\Delta H_{об} = \Delta H_{об}^0 \left(\frac{V_o - k V_{ср.г}}{V_{p,об}} \right)^2 = 9,3 \left(\frac{390 - 270}{300} \right)^2 = 1,5 \text{ м}.$$

На основании расчетов построены графики потерь напора (см. рис. 1.10). Видно из графика, при максимальном часовом водоразборе из обратного трубопровода пьезометрический напор в обратной линии меньше высоты абонента 2. Для предотвращения опорожнения местной системы предусматривается установка регулятора давления «до себя» на обратной линии узла ввода.

§ VII.6 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СЕТЕЙ С НАСОСНЫМИ И ДРОССЕЛИРУЮЩИМИ ПОДСТАНЦИЯМИ

Работа крупных тепловых сетей при сложных рельефах местности практически невозможна без подстанций. С их помощью облегчается решение таких инженерных задач, как повышение пропускной способности действующих сетей, увязка гидравлических режимов, увеличение радиуса действия сетей, расширение возможностей центрального регулирования и др. Насосные подстанции подразделяются на подкачивающие и смесительные. Подкачивающие подстанции устраиваются на подающих и обратных трубопроводах для повышения или снижения напоров.

Подстанции на обратном трубопроводе обычно предусматриваются при значительном понижении рельефа местности в направлении от источника тепла до потребителей или при большой протяженности сетей (рис. VII. 16). Гидравлические режимы сетей с насосными подстанциями изменяются различно в зависимости от наличия или отсутствия на абонентских вводах регуляторов расхода. Во всех случаях давление в обратном трубопроводе при выключенной насосной подстанции для конечных потребителей может превысить пределы прочности отопительных приборов. Включение в работу насосной подстанции при неавтоматизированных абонентских вводах приводит к увеличению общего расхода воды в сетях и росту потерь напора, в связи с чем уклоны пьезометрических линий увеличиваются. Поэтому располагаемые напоры на участках между ТЭЦ и подстанцией уменьшаются, а на участках между подстанцией и конечным потребителем—увеличиваются. В результате наблюдается несоответственная разрегулировка абонентских систем. На абонентских вводах с регуляторами расхода (РР) включение насосной подстанции не изменяет расхода воды в сети. В результате уклоны пьезометрических линий остаются неизменными, но на участках между подстанцией и концом сети напор в обратном трубопроводе уменьшается на величину напора, развиваемого насосами подстанции. Включение насосной подстанции на обратной магистрали дает возможность увеличить недостаточный располагаемый напор у конечных абонентов. Насосная подстанция разделяет тепловую сеть на две зоны с самостоятельными гидравлическими режимами, а при сложном, рельефе местности и различными статическими уровнями S_1 — S_I и S_{II} — S_{II} . Аварийная остановка насосов подстанции вызывает изменение гидравлического режима 2 на режим 1.

Для предупреждения недопустимого роста давления у конечных потребителей устанавливаются мембранные клапаны расщепки *МК*, которые с повышением давления в нейтральной точке O_{II} полностью закрываются. Давление в отсеченной зоне II падает до статического. Под воздействием более высокого давления в обратном трубопроводе зоны I за подкачивающим насосом обратный клапан у подкачивающего насоса закрывается, в результате чего зона II низкого давления гидравлически изолируется от

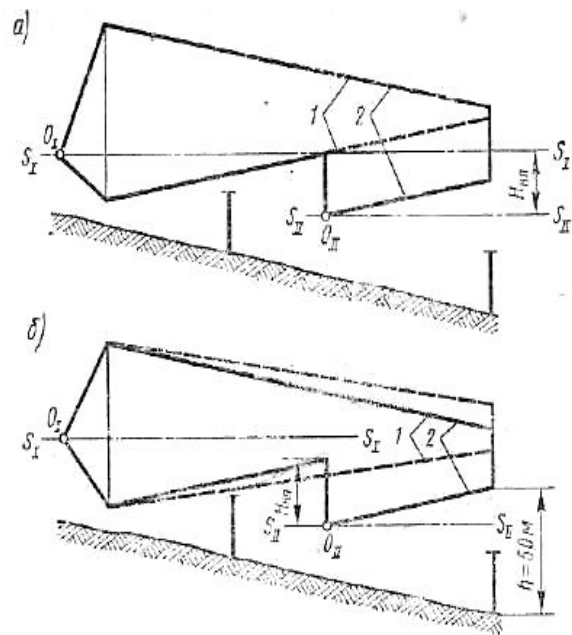


Рис. VII.16. Принципиальная схема двухтрубной водяной тепловой сети с насосной подстанцией на обратной линии и пьезометрические графики сети: а — с автоматизированными вводами; б — при отсутствии на вводах регуляторов расхода; 1 — пьезометрический график сети при отключении подстанции; 2 — то же, с включенной подстанцией; НП — насос подстанции; МК — мембранный расщепный клапан; РР — регулятор подпитки

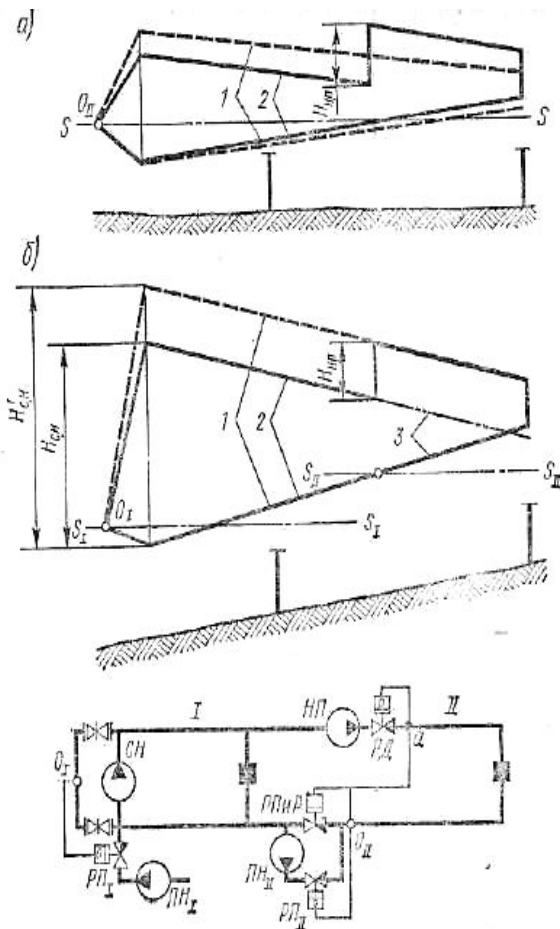


Рис. VII.17. Принципиальная схема двухтрубной водяной тепловой сети с насосной подстанцией на подающем трубопроводе и пьезометрические графики сети:

а — с невтоматизированными вводами; б — при наличии на вводах регуляторов расхода; 1 — пьезометрический график при выключенной подстанции и напоре сетевого насоса $H_{с.н}$; 2 — то же, с включенной подстанцией при напоре сетевого насоса $H_{с.н}$; 3 — то же, при выключенной подстанции; НП — подкачивающий насос подстанции; РРПР — регулятор подпитки и расщетки

зоны I. Подпитка сети зоны II и поддержание статического давления $S_{II} — S_{II}$ в ней производится автоматическим перепуском воды из обратной линии зоны I, находящейся под большим давлением, в зону с меньшим давлением с помощью регулятора подпитки РП_{II}.

Насосные подстанции на **подающем трубопроводе** применяют при значительном подъёме рельефа местности в направлении от источника тепла к потребителям, а также при большой протяженности сетей (рис. VII.17). Разность геодезических отметок тепловой станции и потребителей может составлять несколько десятков и даже сотен метров. При едином для всей сети статическом напоре может произойти опорожнение у одних и раздавливание отопительных приборов у других потребителей. Поэтому тепловая сеть разбивается на независимые в статическом отношении зоны. Статический режим зоны II создается работой подпиточного насоса ПН_{II} с потребным напором $H_{в.п.}$.

Циркуляцию воды можно обеспечить сетевым насосом с напором $H_{с.н.}$. Но такое решение не всегда экономически и технически целесообразно, так как большой напор насоса удорожает теплофикационное оборудование станции, увеличивает расход электроэнергии на перекачку теплоносителя и повышает опасность разрыва подающих трубопроводов и оборудования абонентских вводов на ближайших к источнику тепла участках.

С включением насосных подстанций на подающем трубопроводе уклоны пьезометрических линий на графике давления изменяются лишь при отсутствии на абонентских вводах регуляторов расхода. Причины, вызывающие изменение уклонов пьезометрических линий, аналогичны описанным для обратного трубопровода. Меняя напор подкачивающего насоса $H_{н.п.}$, можно создать нужные пределы располагаемых напоров в сетях зоны II.

Защита потребителей зоны II от опорожнения производится с помощью регулятора подпора и рассечки РП и Р и регулятора давления РД. При понижении давления в точке а, вызванном остановкой подкачивающих насосов, регуляторы рассечки и давления закрываются, отключая сети зоны II. Постоянный статический напор $S_{II} — S_{II}$ поддерживается подпиточным насосом ПН_{II}.

Подкачивающие подстанции могут быть установлены одновременно на обеих магистралях. Производительность подкачивающих насосов принимают по расходу воды на участке сети в месте установки насосов. Напор насосов $H_{н.п.}$ определяют по пьезометрическим графикам.

Смесительные подстанции предназначены для понижения температуры сетевой воды с целью перехода с высокотемпературных графиков регулирования на более низкие путем подмешивания обратной воды.

Смесительные подстанции устанавливаются на транзитных магистралях (рис. VII.18) или на ответвлениях распределительных трубопроводов. При этом насосы размещают на перемычке между подающим и обратным трубопроводами, и они служат для подачи обратной воды к клапанам смешения, установленным на подающем трубопроводе.

В месте установки смесительной подстанции сеть разделяют на две зоны: высоких (зона I) и пониженных (зона II) температур и давлений теплоносителя. На границе зон вследствие дросселирования воды в регуляторе *РД* и клапане *КСиР* возникает небольшой перепад напоров $\Delta H_{п.с}$. Для нормальной работы сети необходимо, чтобы напор смесительных насосов превышал напор в подающем трубопроводе на 5—10 м. Производительность насосов $V_{см}$ определяют по (

где V_I —расход воды в подающем трубопроводе, м³/ч; u — коэффициент соотношения

$$V_{см} = uV_I, \quad (VII.32)$$

где τ'_1 — расчетная температура воды в подающем трубопроводе, $\tau'_{1,с}$ — температура воды в подающем и обратном трубопроводах после смешения

$$u = \frac{\tau'_1 - \tau'_{1,с}}{\tau'_{1,с} - \tau'_{2,с}}, \quad (VII.33)$$

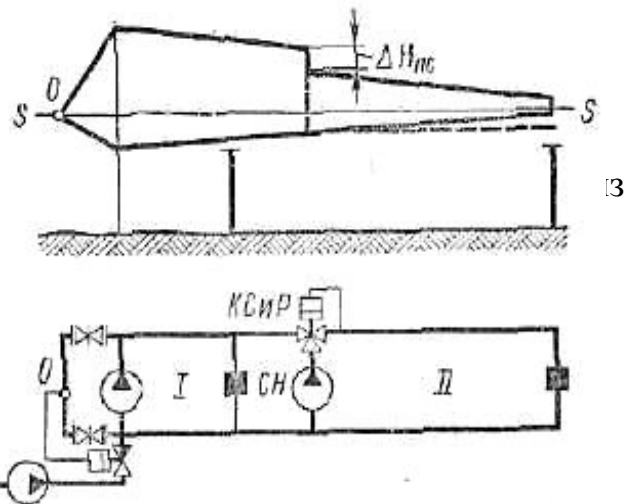


Рис. VII.18. Принципиальная схема двухтрубной водяной тепловой сети со смесительной насосной подстанцией и пьезометрический график:

СН — смесительный насос; *КСиР* — клапан смешения и рассечки

При выключении смесительных насосов клапан $KCuP$ закрывается, гидравлически разобщая зоны I и II. При этом с прекращением циркуляции воды в зоне II в подающем и обратном трубопроводах устанавливается давление, определяемое давлением в обратном трубопроводе в конце зоны I (режим, показанный на пьезометрическом трафике пунктиром).

Смесительные подстанции применяют часто для автономного теплоснабжения рабочих районов (зона II), подключаемых к тепловым сетям (зона I) промышленных предприятия, в которых принят температурный график регулирования, недопустимый для отопления жилых домов. Смесительные подстанции наиболее эффективны в крупных двухтрубных (см. § XI.9), а также в однетрубных системах дальнего теплоснабжения (см. рис. II.7), когда в магистральных сетях температура сетевой воды превышает 150°C или когда большие группы потребителей не могут использовать сетевую воду с температурой 150°C .

Дросселирующие подстанции используют для понижения давления теплоносителя к группам потребителей, расположенных на местности с большой разностью геодезических отметок. Уменьшение давления производят на отдельных участках магистральных сетей (рис. VII. 10) или на ответвлениях к потребителям. Такие подстанции применяют с целью типового присоединения отопительных приборов по наиболее простой зависимой схеме. Допустимые режимы динамического давления в нижней зоне I обеспечиваются на дроссельной подстанции регулятором давления «до себя», установленным на обратном трубопроводе. Регулятор давления настраивают на дросселирование напора $H_{p,d}$, при котором давление в обратной линии зоны I не превышает 60 м. При аварийной остановке сетевого насоса статический напор $S_{II} — S_{II}$ в зоне II вследствие утечек начнет падать до статического напора $S_I — S_I$. Защиту систем отопления зоны II от опорожнения производят отключением этих сетей с помощью обратного клапана на подающем трубопроводе и РДДС и включением подпиточного насоса ПН_{II} установленных на подстанции.

§ VII.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Безаварийная работа тепловых сетей зависит от скорости производимых на подстанциях переключений резервного и защитного оборудования, поэтому крупные подстанции должны быть полностью автоматизированы. Одной из важнейших задач автоматизации является надежная гидравлическая изоляция зон с различными уровнями давлений. Отключение аварийного участка тепловой сети производится с помощью обратных клапанов, регуляторов давлений,

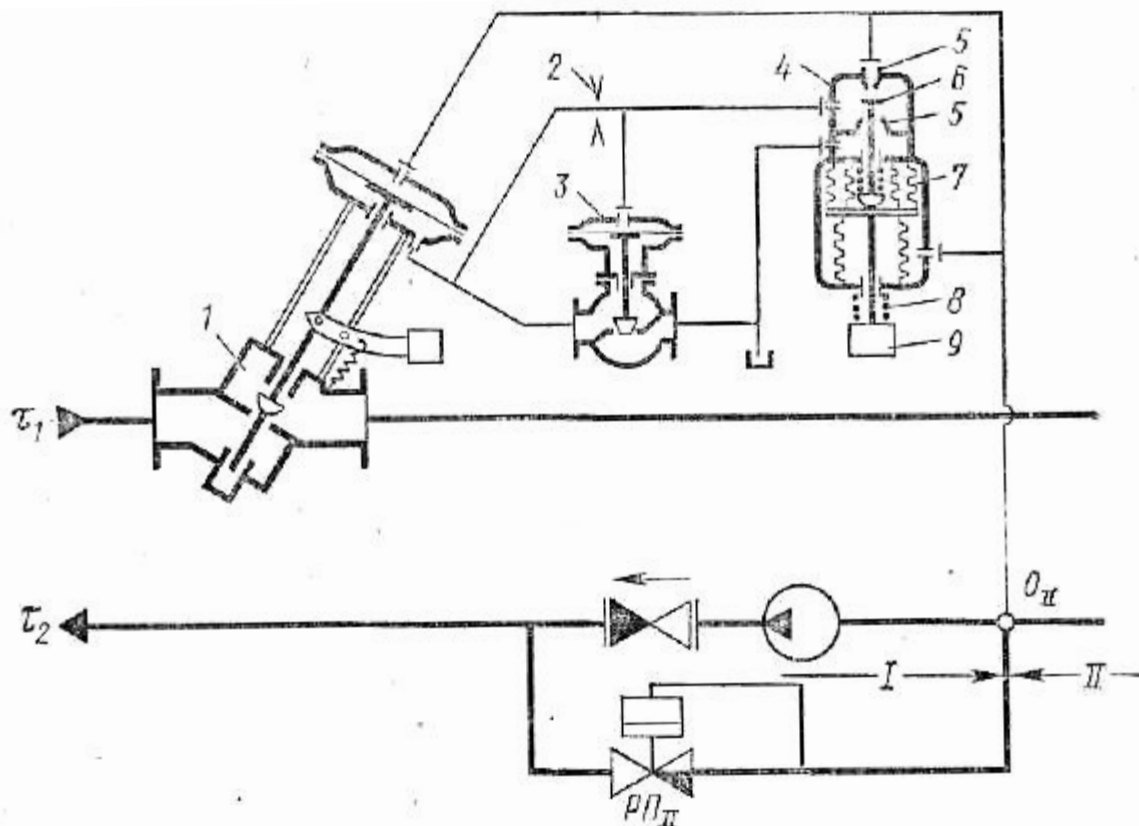


Рис. VII.19. Схема автомата расщепки сети системы ОРГРЭС:

1 — клапан расщепки; 2 — шайба дроссельная; 3 — импульсный клапан; 4 — гидравлическое реле; 5 — сопла; 6 — клапан; 7 — сильфон; 8 — пружина; 9 — груз; РП — регулятор подпитки

а также специальных автоматов. На рис. VII.19 приведена схема автомата для аварийного отключения сетей с насосными подстанциями на обратных трубопроводах. Принцип действия автомата рассмотрим на примере пьезометрического графика на рис. VII. 16. При повышении давления в нейтральной точке O_{II} клапан 6 (рис. VII. 19) гидравлического реле перемещается вверх и перекрывает верхнее сопло 5. Через открытое нижнее сопло 5 полость под мембраной импульсного клапана сообщается с атмосферой. Клапан откроется, и слив воды из полости под мембраной клапана расщетки обеспечит в ней атмосферное давление. Высокое давление в верхней полости над мембраной клапана расщетки приведет к его закрытию. Циркуляция в сетях зоны II прекратится, а давление понизится до статического $S_{II} - S_{II}$. Под действием более высокого давления в обратном трубопроводе зоны I закроется обратный клапан перед насосами. Дроссельная шайба 2 на импульсной линии между клапаном, расщетки и реле, увеличивая разность давлений, действующую на мембрану и клапанок импульсного клапана 3, способствует сокращению времени опорожнения полости под мембраной клапана расщетки. При возобновлении циркуляции в сети произойдет обратное действие приборов, и клапан расщетки откроется. Настройка автомата производится в зависимости от выбранного давления в нейтральной точке O_{II} подбором пружины 8 и груза 9 реле давления. После срабатывания гидравлической защиты автоматически включается система подпитки отключенных сетей (рис. VII.20). Импульс на открытие регулятора подпитки поступает из точки A на подающем трубопроводе. Падение давления в точке A до уровня давления в нейтральной точке O_{II} вызовет перемещение клапана 9 вверх до закрытия верхнего сопла реле давления, в результате чего на надмембранную полость регулятора подпитки будет действовать высокое давление в точке B на обратном трубопроводе зоны I. Мембрана прогнется и откроет клапан регулятора подпитки. Величина открытия клапана регулируется с помощью иглы, вводимой в сопло, дросселирующее поток воды на линии между точкой B и мембранной полостью регулятора I. Настройка давления подпитки производится регулировочным винтом 5 реле давления.

Автоматическое регулирование насосной подстанции на подающем трубопроводе (рис. VII.21) основано на использовании регулирующих приборов, конструкции которых приведены на рис. VII. 19, VII.20. Регулятор давления *РД* поддерживает давление в сетях верхней зоны, а собственное гидравлическое сопротивление регулятора создает соответствие гидравлических характеристик подкачивающих насосов $H_{н.н}$ и сети зоны II.

Регулятор подпора и расщетки включается по двухимпульсной схеме на давление в точках A и O_{II} . В качестве регулятора подпора прибор приводится в действие по импульсу давления в нейтральной точке O_{II} . Аварийное падение давления в точке A приводит в действие прибор в качестве регулятора расщетки, вызывая через реле P_2 открытие импульсного клапана и закрытие регулятора расщетки. Настройка регулятора производится подбором отверстия шайбы III такого диаметра, чтобы при нормальной работе

насосов подстанции прибор действовал только в качестве регулятора подпора. После расщепки сети включаются подпиточные насосы $ПН_{II}$. Сигнал аварийной подпитки верхней зоны поступает от контактного манометра, установленного вблизи нейтральной точки. Давление подпитки поддерживается регулятором подпитки $РП_2$ через реле P_3 .

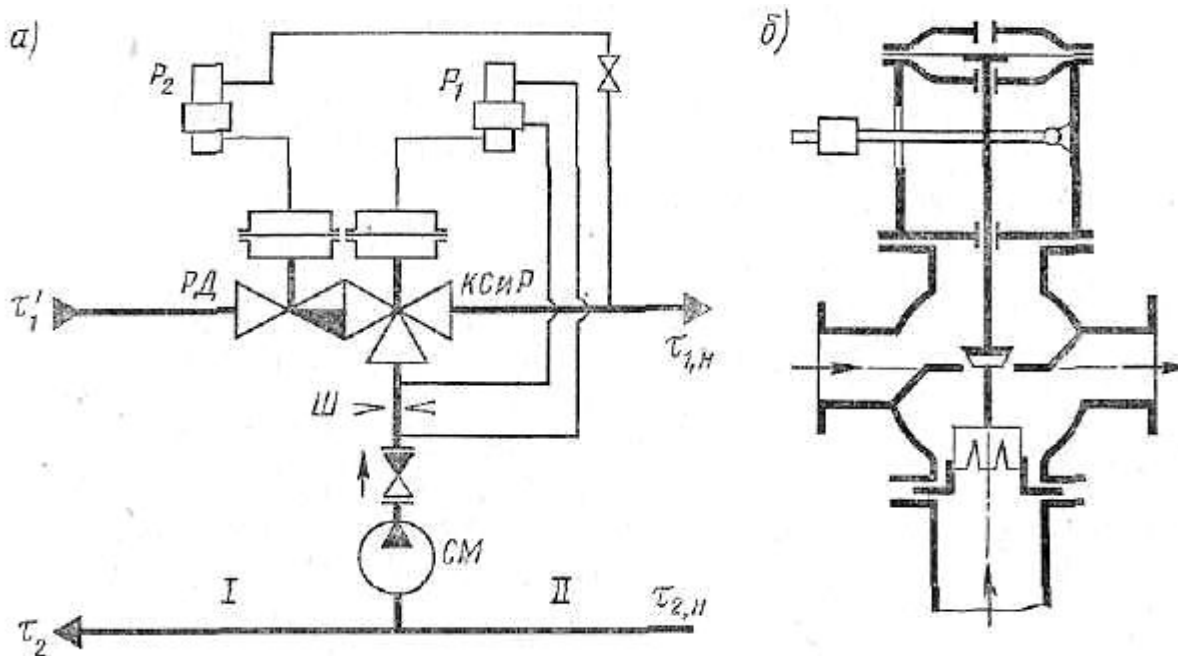


Рис. VII.22. Схема автоматического регулирования смесительной подстанции:
а — схема автоматики; б — клапан смешения и расщепки

В смесит. (рис. VII.22).
Расход воды на подмешивание устанавливается настройкой реле давления P по величине перепада в расходной диафрагме $Ш$ и подбором груза на рычаге клапана смешения. При аварийной остановке смесительных насосов клапан смешения действует как регулятор расщепки, так как падение давления до диафрагмы приводит к перемещению регулирующих органов в реле P_2 , вызывающих прогиб мембраны и закрытие клапана $КС$ и реле P . После отключения сетей зоны II регулятор $РД$ приводится в состояние рабочей готовности открытием вентиля. С пуском смесительных насосов клапан $КС$ и P под давлением воды на нижнюю профилированную часть золотника автоматически открывается. С повышением давления в импульсных линиях и реле P_2 приводит в действие регулятор давлений $РД$, контролирующий давление невоскипания воды в зоне II.

На рис. VII.23 приведена схема автоматизации совмещенных насосной и дроссельной подстанций. В рабочем режиме реле давления $P-4$, клапан $PK-3$, вентили автономного управления регулирующими клапанами $B1$ и $B2$ полностью закрыты. Давление в точке 3 передается на реле расщепки $P-1$, а из него в надмембранные полости импульсных клапанов $ИК-1$ и $ИК-2$. Прогнуввшись, мембраны перемещают штоки, полностью перекрывая нижние проходные сечения клапанов. Верхние проходные сечения импульсных клапанов $ИК-1$ и $ИК-2$ полностью открыты, поэтому клапаны $PK-1$ и $PK-2$ работают в режиме регулирования.

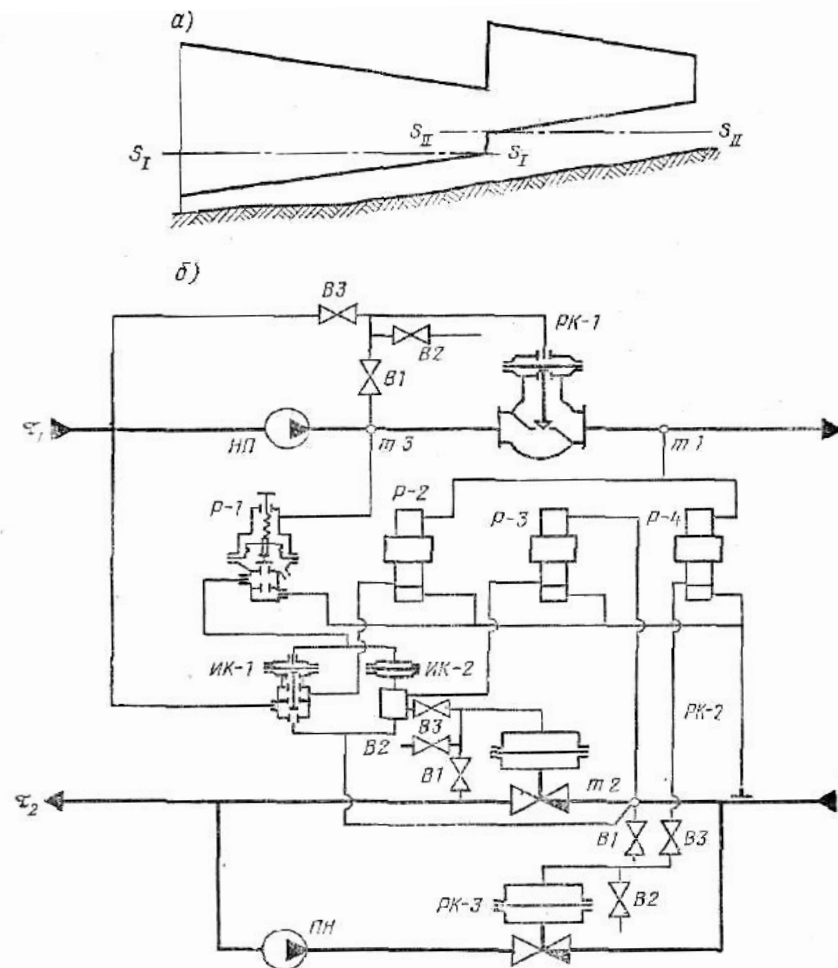


Рис. VII.23. Принципиальная схема автоматизации совмещенных насосной и дроссельной подстанций и пьезометрический график сети:
 $НП$ — подкачивающий насос подстанции; P — реле давления; $ИК$ — импульсный клапан; $ПН$ — подпиточный насос

Повышение давления в точке *1* через систему автоматов *P-2* и *ИК-1* воздействует на регулирующий клапан *PK-1*, который прикрывается, дросселируя часть напора, и давление в точке *1* уменьшается до заданного значения. Аналогично работает регулятор подпора *PK-2* через реле *P-3* и импульсный клапан *ИК-2*.

При аварийной остановке подкачивающих насосов на подающем трубопроводе и падении давления в точке *3* импульсные клапаны *ИК-1* и *ИК-2* открывают проходы для воды из точки *2* на гидроприводы клапанов *PK-1* и *PK-2*. Регулирующие клапаны закрываются и отсекают теплосеть на гидравлически изолированные зоны. С падением давления в точке *1* включается в работу подпиточный насос *ПН*. Давление подпитки поддерживается на уровне статического давления зоны II клапаном *PK-3* через реле давления *P-4*.

Когда включаются подкачивающие насосы, схема автоматически восстанавливает рабочий режим.

§ VII.8. РАСЧЕТ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Устройство резервных перемычек, резервирующих подстанций, блокировочных перемычек для магистральных сетей, питающихся от нескольких источников тепла, превращает тепловые сети крупных городов в сложные многокольцевые системы. Гидравлический режим их очень чувствителен к изменениям расходов теплоносителя на отдельных участках сети. Принцип расчета таких систем основан на уравнениях Кирхгофа (применительно к тепловой сети), а именно:

1) $\Sigma V = 0$,

где ΣV — алгебраическая сумма расходов воды в любом узле;

2) $\Sigma S V^2 = 0$,

где $\Sigma S V^2$ — алгебраическая сумма потерь напора для любого замкнутого контура.

Существует два различных условия расчета. Для автоматизированных вводов известны расходы воды у абонентов и характеристики сопротивления участков магистралей кольцевой сети. Для неавтоматизированных вводов известен располагаемый напор в узле подвода сетевой воды к кольцу в характеристики сопротивления всех участков. В обоих случаях требуется найти распределение расхода воды по участкам сети.

Рассмотрим первый случай, когда на абонентских вводах установлены регуляторы расхода на примере простейшей кольцевой сети (рис. VII.24). Зададимся произвольными расходами и направлениями потоков воды, как показано на расчетной схеме. При этом условимся считать положительными приток воды в узел и потерю напора для расхода, проходящего в контуре по часовой стрелке, а отрицательными — сток воды из узла и потерю напора для расхода, проходящего против часовой стрелки.

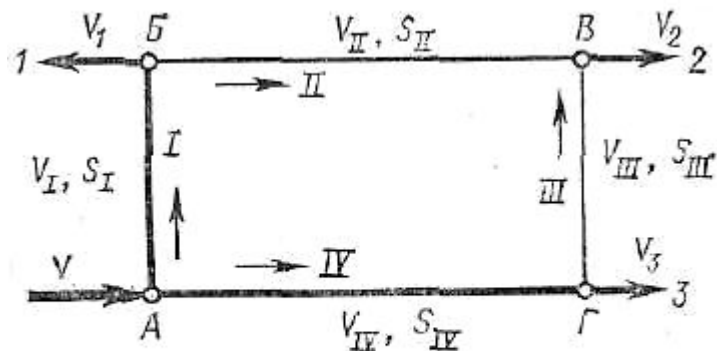


Рис. VII.24. Расчетная схема кольцевой сети с одним источником тепла

Согласно первому уравнению Кирхгофа

$$\begin{aligned} V_I &= V_1 + V_{II}; & V_{II} &= V_2 - V_{III}; & V_{IV} &= V_3 + V_{III}; \\ V &= V_I + V_{IV} = V_1 + V_2 + V_3. \end{aligned} \quad (\text{VII.34})$$

Обычно при произвольно выбранном направлении потоков второе уравнение не соблюдается, поэтому

$$\Sigma SV^2 = S_I V_I^2 + S_{II} V_{II}^2 - S_{III} V_{III}^2 - S_{IV} V_{IV}^2 \pm \Delta P = 0, \quad (\text{VII.35})$$

Где ΔP — невязка потерь давления.

Положительное значение невязочного напора ($\Delta P > 0$) свидетельствует о перегрузке участков I, II по направлению часовой стрелки и недогрузке участков III, IV. Отрицательная величина невязки напоров указывает на обратное. Для устранения невязки напоров при $\Delta P > 0$ необходимо уменьшить расходы на участках I, II с движением воды по часовой стрелке, а на участках III, IV увеличить на одну и ту же величину невязочного расхода. Полагая, что после введения в уравнение (VII.35) увязочного расхода ΔV второе уравнение Кирхгофа выполняется:

$$S_I (V_I - \Delta V)^2 + S_{II} (V_{II} - \Delta V)^2 - S_{III} (V_{III} + \Delta V)^2 - S_{IV} (V_{IV} + \Delta V)^2 = 0. \quad (\text{VII.36})$$

Решая это равенство относительно увязочного расхода ΔV^2 и пренебрегая незначительностью величины ΔV^2 , значение увязочного расхода определяем соотношением

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{2 \sum SV}, \quad (\text{VII.37})$$

Где $\sum SV$ — величина всегда положительная.

Вводя эту поправку в уравнение (VII.36), повторно проводят проверочный расчет и уточняют значение новой, более точной поправки по соотношению (VII.37).

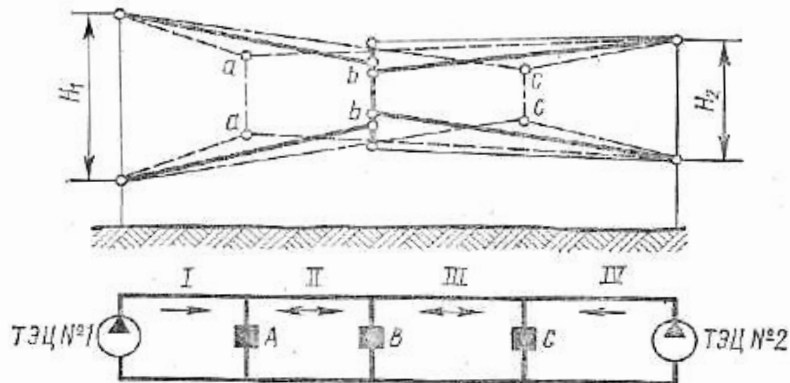


Рис. VII.25. Схема и пьезометрический график кольцевой сети с двумя источниками тепла:

— при произвольно выбранном водоразделе в точке В при $\Delta P > 0$; — то же, при $\Delta P < 0$; -.-.- при смещении водораздела в точку С; - - - - - то же, в точку А

Так в результате нескольких уточнений определяют окончательно расходы воды на участках и точку водораздела кольца.

При питании сети от двух и более источников расположение точки водораздела определяют аналогичным образом (рис. VII.25). Зададимся произвольно точкой водораздела (точка *B*) и составим второе уравнение Кирхгофа:

$$S_I V_I^2 + S_{II} V_{II}^2 - S_{III} V_{III}^2 - S_{IV} V_{IV}^2 - g\rho (H_1 - H_2) = \Delta P, \quad (VII.38)$$

Где $H_1 - H_2 = \Delta H$ — разность напоров сетевых насосов, установленных на ТЭЦ № 1 и ТЭЦ № 2.

Определив увязочный расход по формуле (VII.37), производят уточнение расположения точки водораздела. При положительном значении невязочного давления ($\Delta P > 0$) точка водораздела сместится в сторону ТЭЦ № 2 (точка *C*), так как перегруженными оказываются участки I, II, и расходы воды на этих участках должны быть уменьшены. При отрицательных значениях невязочных давлений ($\Delta P < 0$) введение увязочных расходов теплоносителя смешает точку водораздела в сторону ТЭЦ № 1 (точка *A*).

Если в промежуточных точках сети имеются насосные подстанции, то при выборе точки водораздела их напоры суммируют с напорами сетевых насосов ТЭЦ в направлении движения теплоносителя.

На положение точки водораздела влияют характеристика сопротивления участков сети и узлов и располагаемые напоры на коллекторах тепловых станций. Увеличение напора сетевого насоса при неизменных гидравлических характеристиках сети смещает точку водораздела в направлении от ТЭЦ (рис. VII.26). Замена труб на больший диаметр или уменьшение нагрузки сетей увеличивает радиус действия ТЭЦ. Следовательно, всякое изменение нагрузок и характеристик сети вызывает изменение располагаемых напоров в сети и на абонентских вводах. Меняя положение точки водораздела, можно добиться экономичной загрузки теплоприготовительных станций.

Расчет потокораспределения в кольцевой сети без регуляторов расхода производят по второму уравнению Кирхгофа методом последовательного приближения. Так как заранее не известны расходы воды у абонентов, то задаются долей расхода воды, поступающей в точку водораздела слева (α) и справа ($1 - \alpha$).

Определяют характеристики сопротивления участков системы (см. рис. VII.25):

$$S = S_{A-I-1-II-2} \text{ и } (-S) = S_{A-IV-3-III-2}, \quad (VII.39)$$

где знаки « + » и «—» соответствуют движению воды по часовой стрелке и против. Затем находят расходы воды по формулам:

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P_A}{S}}; \quad (-V) = \sqrt{\frac{\Delta P_A}{(-S)}}, \quad (\text{VII.40})$$

где ΔP_A — располагаемый перепад давлений в точке подвода воды к кольцу.

Далее проверяют выполнение второго уравнения Кирхгофа. При положительной невязке давления снижают долю расхода воды α , при отрицательной — долю расхода воды α увеличивают. Можно, оставив α такими же, переместить точку водораздела в узел B или C . Подбор величин α производят до тех пор, пока не будет удовлетворено второе уравнение Кирхгофа.

Пример 1. Для двухтрубной кольцевой водяной сети (см. рис. VII.25) диаметром 273x7 мм определить расходы воды на участках и разность давлений в точке водораздела. Давление сетевых насосов станций 0,7 МПа. При расчете принять: длины участков $l_I=200$ м; $l_{II}=400$ м; $l_{III}=150$ м; $l_{IV}=450$ м; расходы воды в ответвлениях $V_1=200$ м³/ч; $V_2=150$ м³/ч; $V_3=300$ м³/ч; коэффициент местных потерь давления $\alpha=0,3$; удельную характеристику сопротивления трубопровода $s=0,1267 \cdot 10^{-2}$ Па·ч²/м⁶·м.

Решение.

1. Сопротивления подающего и обратного трубопроводов для участков сети:

$$S_I = sl_I (1 + \alpha)^2 = 0,1267 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 0,3)^2 \cdot 200 \cdot 2 = 0,66 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6;$$

$$S_{II} = sl_{II} (1 + \alpha)^2 = 0,1267 \cdot 10^{-2} \cdot 400 \cdot 1,3^2 = 1,32 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6;$$

$$S_{III} = sl_{III} (1 + \alpha)^2 = 0,1267 \cdot 10^{-2} \cdot 150 \cdot 1,3^2 = 0,49 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6;$$

$$S_{IV} = sl_{IV} (1 + \alpha)^2 = 0,1267 \cdot 10^{-2} \cdot 450 \cdot 1,3^2 = 1,48 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6.$$

2. Определяем расходы воды на участках сети, предположив точку водораздела на участке III:

$$V_I = V_1 + V_2 = 200 + 150 = 350 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{II} = V_2 = 150 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{III} = 0;$$

$$V_{IV} = -V_3 = -300 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_V = 350 + 300 = 650 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3. Величина невязки потерь давления в кольце I—II—III—IV.

$$\Delta P = 0,66 \cdot 350^2 + 1,32 \cdot 150^2 + 0,49 \cdot 0 - 1,48 \cdot 300^2 = -0,0226 \text{ МПа}.$$

4. Величина

$$\sum SV = 0,66 \cdot 350 + 1,32 \cdot 150 + 0,49 \cdot 0 + 1,48 \cdot 300 = 870 \text{ Па} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

5. Увязочный расход воды [формула (VII.36)]

$$\Delta V = -\frac{22600}{870 \cdot 2} = -13 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

6. Уточненные расходы воды на участ.....

$$V'_I = V_I - \Delta V = 350 + 13 = 363 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V'_{II} = 150 + 13 = 163 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V'_{III} = 0 + 13 = 13 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V'_{IV} = -300 + 13 = -287 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

7. Повторно определяем величину невязки потерь давления

$$\Delta P' = (0,66 \cdot 363^2 + 1,32 \cdot 163^2 + 0,49 \cdot 13^2 - 1,48 \cdot 287^2) = 210 \text{ Па} = 0,21 \cdot 10^{-6} \text{ МПа.}$$

Невязка потерь давления ничтожно мала, ею можно пренебречь, поэтому принимаем водораздел в точке Г.

8. Потеря давления от станции до ответвления № 3

$$\Delta P_{A-3} = 0,66 \cdot 363^2 + 1,32 \cdot 163^2 + 0,49 \cdot 13^2 = 0,122 \text{ МПа.}$$

9. Разность напоров в точках подключения к кольцу ответвления № 3

$$\Delta P_g = 0,7 - 0,122 = 0,578 \text{ МПа.}$$

Пример 2. Определить расходы воды на участках закрытой двухтрубной тепловой сети, питаемой от двух источников тепла, а также разность давлений в точках водораздела (см. рис, VII.25). При расчете принять: расходы воды у абонентов $V_A = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$; $V_B = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$; $V_C = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$; характеристики сопротивлений участков магистрали: $S_I = 5 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2/\text{м}^6$; $S_{II} = 1,5 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2/\text{м}^6$; $S_{III} = 0,6 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2/\text{м}^6$; $S_{IV} = 2 \text{ Па} \cdot \text{ч}^2/\text{м}^6$; разность напоров на коллекторах станций

$$\Delta H = H_1 - H_2 = 130 - 100 = 30 \text{ м.}$$

Решение.

1. Задавшись точкой водораздела в ответвлении к абоненту B , находим расходы воды на участках сети:

$$V_I = V_A + 0,5V_B = 300 + 0,5 \cdot 200 = 400 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{II} = 0,5V_B = 0,5 \cdot 200 = 100 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{III} = -0,5V_B = -0,5 \cdot 200 = -100 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{IV} = -V_C - 0,5V_B = -500 - 100 = -600 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

2. Невязка давления

$$\begin{aligned}\Delta P &= S_I V_I^2 + S_{II} V_{II}^2 - S_{III} V_{III}^2 - S_{IV} V_{IV}^2 - \Delta H \rho g = \\ &= 5 \cdot 400^2 + 1,5 \cdot 100^2 - 0,6 \cdot 100^2 - 2 \cdot 600^2 - 3 \cdot 10^5 = -0,211 \text{ МПа.}\end{aligned}$$

Невязка давления отрицательна, что указывает на перегрузку участков, питаемых от источника тепла № 2.

3. Увязочный расход воды

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{2 \sum SV} = \frac{-0,211}{2(5 \cdot 400 + 1,5 \cdot 100 + 0,6 \cdot 100 + 2 \cdot 500)} = -33 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

4. Уточненные расколы воды на участках магистрали:

$$V'_I = V_I - \Delta V = 400 + 33 = 433 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V'_{II} = 100 + 33 = 133 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V'_{III} = -100 + 33 = -67 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V'_{IV} = -600 + 33 = -567 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

5. Невязка давления при уточненных расходах воды

$$\Delta P' = 5 \cdot 433^2 + 1,5 \cdot 133^2 - 0,6 \cdot 67^2 - 2 \cdot 567^2 - 3 \cdot 10^5 = 0,0178 \text{ МПа.}$$

6. Уточненный увязочный расход воды

$$\Delta V' = \frac{0,0178 \cdot 10^6}{2(5 \cdot 433 + 1,5 \cdot 133 + 0,6 \cdot 67 + 2 \cdot 567)} = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

7. Расходы воды на участках:

$$V_I'' = 433 - 2,5 = 430,5 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{II}'' = 133 - 2,5 = 130,5 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{III}'' = -67 - 2,5 = -69,5 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{IV}'' = -567 - 2,5 = -569,5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

8. Невязка давления

$$\Delta P'' = 5 \cdot 430,5^2 + 1,5 \cdot 130,5^2 - 0,6 \cdot 69,5^2 - 2 \cdot 569,5^2 - 3 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}.$$

Невязка напора незначительна, найденное потокораспределение достаточно. Водораздел находится в точке ответвления к потребителю *B*.

9. Разность давлений в точке водораздела

$$\Delta P_B = 1,3 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot 430,5^2 - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 130,5^2 = 0,35 \text{ МПа}.$$