

## Остывание теплоносителя в системах отопления

В. Б. Волков, главный специалист частного предприятия «ВентПроект», г. Минск.

**Ключевые слова:** остывание теплоносителя; гидравлический расчет; отопление; теплоснабжение; тепловые сети; тепловая изоляция; приборы отопления.

*Одним из наиболее важных параметров для подбора приборов отопления является средняя температура теплоносителя в нем. А значит также важен и этап расчета остывания теплоносителя в трубопроводах.*

### Тенденции развития систем водяного отопления

Следует отметить несколько важных изменений в требованиях к системам отопления за последние 30–50 лет, которые повлияли на транзитные теплопотери трубопроводов и их учет в тепловом балансе помещения.

1. Значительно снизилась доля однотрубных систем (см. рис. 1). И если в производственных или в общественных зданиях их еще можно встретить, например, в виде ветки для компактно расположенных технических помещений, то в жиле практически все системы отопления только двухтрубные. Напомню, одним из преимуществ однотрубных систем является экономия труб, меньшая металлоемкость по сравнению с двухтрубными. Больше труб – больше и потерь тепла.

2. Стали практически обязательными требования архитекторов и заказчиков к скрытой прокладке труб отопления (см. рис. 2), тем самым значительно уменьшается та часть теплопотерь труб, которая также (равноценно!) участвует в нагреве воздуха помещения, как и приборы отопления. Потери тепла трубопровода, проложенного в коридоре от узла учета к входной двери квартиры, в отоплении этой квартиры практически не участвует. То же самое можно сказать и о трубопроводе, расположенном в подвесном потолке помещения. Почти все потери тепла трубами в здании остаются в самом здании, но учесть все перетоки этого тепла по зашивкам и строительным конструкциям практически невозможно.

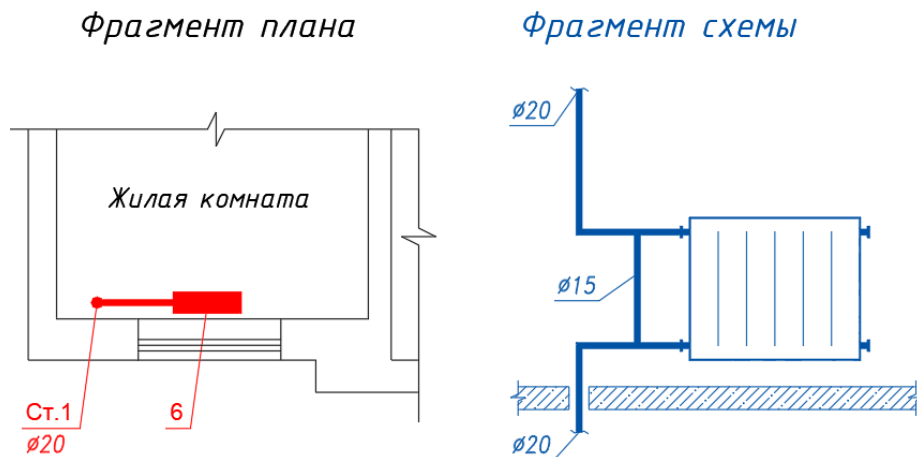


Рис. 1.

### Фрагмент плана

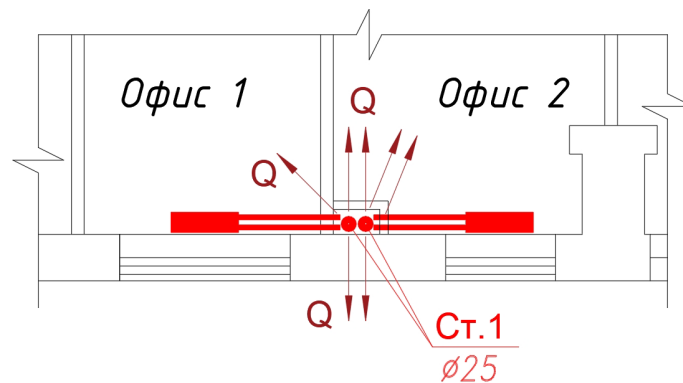


Рис. 2.

3. Уменьшилась гидравлическая устойчивость систем отопления. А значит, все держится на автоматике и балансировке. Раньше подавляющее большинство систем проектировалось на сопротивление не более 1,5 м. Как правило, от 0,5 м в совсем малых объектах до 1–1,2 м в больших. Низкое сопротивление делало систему отопления гидравлически устойчивой, а теплоноситель, напрямую поступающий из тепловой сети, исключал дефицит расхода в системе отопления. Сегодня, вследствие широкого применения термостатических клапанов, балансировочной арматуры и независимой схемы подключения к тепловым сетям, потери давления в многоквартирных домах увеличились до 5–7 м. Такая система уже требует более точных расчетов, подбора оборудования и выполнения всего объема пусконаладочных работ, т. к. разница потерь давления по веткам или стоякам может быть довольно большой и вызывать критическое потокораспределение в системе трубопроводов.

#### Методика и некоторые особенности расчета

Методика расчета теплообмена между жидкостью (вода), движущейся в трубе с определенной скоростью, и окружающим трубу воздухом известна и хорошо проработана с достаточной для инженерных расчетов детализацией и учетом всех составляющих этого процесса. Этот сложный тип теплообмена включает в себя теплоотдачу жидкости к стенке трубопровода, перенос тепла теплопроводностью материала трубопровода и тепловой изоляции, если она есть, и теплоотдачу от поверхности трубы (изоляции) к окружающему воздуху – конвективная и лучистая составляющие. Методика базируется на зависимостях, использующих критерии подобия  $Re$ ,  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ . Для подстановки всех значений во все формулы потребуется собрать довольно большое количество данных: скорость течения жидкости и воздуха вокруг трубопровода, их температуры, теплофизические свойства, включая материал стенки трубы (изоляции), степень черноты поверхности трубы, приведенную (усредненную) степень черноты окружающих трубопровод поверхностей и т. д. Подробнее см. [1], стр. 69–103, а также некоторые уточнения в [2], табл. 2–33, стр. 177.

Некоторые результаты расчета по данной методике, выполненные в программе «СигмаКАД», можно продемонстрировать получив величины изменения температуры теплоносителя и среднюю плотность теплового потока для наиболее распространенных диаметров в зависимости от скоростей теплоносителя, характерных для систем отопления (см. табл. 1).

Таблица 1

Изменение температуры теплоносителя, °С (числитель), и средняя плотность теплового потока, Вт/м (знаменатель), на участке трубопровода длиной 10 м из труб по ГОСТ 3262 в зависимости от диаметра и скорости теплоносителя.

Ду	0,1			0,2			0,4			0,6		
	Н	И30	И50	Н	И30	И50	Н	И30	И50	Н	И30	И50
15	<u>-8,30</u>	<u>-1,48</u>	–	<u>-4,20</u>	<u>-0,74</u>	–	<u>-2,11</u>	<u>-0,37</u>	–	<u>-1,41</u>	<u>-0,25</u>	–
	59,99	11,53		63,32	11,62		65,13	11,67		65,76	11,68	
20	<u>-5,54</u>	<u>-0,92</u>	–	<u>-2,80</u>	<u>-0,46</u>	–	<u>-1,41</u>	<u>-0,23</u>	–	<u>-0,94</u>	<u>-0,15</u>	–
	75,20	13,13		78,21	13,20		79,83	13,24		80,40	13,25	
25	<u>-4,11</u>	<u>-0,64</u>	<u>-0,05</u>	<u>-2,08</u>	<u>-0,32</u>	<u>-0,25</u>	<u>-1,04</u>	<u>-0,16</u>	<u>-0,13</u>	<u>-0,70</u>	<u>-0,11</u>	<u>-0,08</u>
	92,41	14,99	11,62	95,38	15,05	11,66	97,00	15,08	11,68	97,57	15,09	11,68
32	<u>-2,86</u>	<u>-0,42</u>	<u>-0,32</u>	<u>-1,45</u>	<u>-0,21</u>	<u>-0,16</u>	<u>-0,73</u>	<u>-0,11</u>	<u>-0,08</u>	<u>-0,49</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,05</u>
	114,5	17,35	13,22	117,4	17,40	13,25	119,0	17,43	13,26	119,5	17,44	13,27
40	<u>-2,50</u>	<u>-0,35</u>	<u>-0,27</u>	<u>-1,24</u>	<u>-0,18</u>	<u>-0,13</u>	<u>-0,62</u>	<u>-0,09</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,42</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,04</u>
	128,2	18,84	14,21	131,2	18,89	14,24	132,8	18,92	14,26	133,4	18,93	14,26
50	<u>-1,78</u>	<u>-0,25</u>	<u>-0,18</u>	<u>-0,90</u>	<u>-0,12</u>	<u>-0,09</u>	<u>-0,45</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,05</u>	<u>-0,30</u>	<u>-0,04</u>	<u>-0,03</u>
	156,6	21,93	16,27	159,7	21,98	16,30	161,4	22,01	16,31	162,0	22,02	16,31

*Примечания:*

температура теплоносителя в начале участка принята 80 °С, температура окружающего воздуха – 18 °С;

Н – не изолированный трубопровод;

И30, И50 – изолированный минеральной ватой,  $\lambda = 0,044$  Вт/(м°С), толщиной соответственно 30 и 50 мм.

Расчет системы отопления представляет из себя несколько взаимосвязанных вычислительных этапов, каждый из которых, если, конечно не прикидывать «на коленке», занимает довольно много времени даже используя специальные вычислительные программы. Можно выделить 6 этапов:

1. Определение тепловых потоков ( $Q_i$ ) на участках исходя из заданной теплоотдачи приборов отопления.
2. Вычисление расходов теплоносителя ( $G_i$ ) на участках.
3. Вычисление теплотерь трубопроводов и дополнительного расхода теплоносителя ( $G$ ) для компенсации этих теплотерь с пересчетом начиная с п. 2.
4. Гидравлический расчет системы трубопроводов (при заданных диаметрах) для определения суммарных потерь давления в системе. Если заданы потери давления, то определение диаметров трубопроводов с пересчетом начиная с п. 3.
5. Определение потерь давления по всем ответвлениям, их увязка и подбор балансировочной арматуры.
6. Подбор приборов отопления.

Большой объем подготовительных расчетов (теплотери, балансы по теплу, воздуху, вычерчивание схемы трубопроводов, подсчет длин участков и т. д.), а также большой объем исходных данных, особенно для этапа 3 – требуют времени и соответствующего подхода к этой работе. И, если на каком-то этапе допустить существенную неточность, погрешность или ошибку, принять абстрактное исходное данное – это может отразиться на всех элементах, а последствия распространятся так или иначе по всей системе отопления и проявятся, скорее всего, в наиболее слабых и критичных ее местах. Иногда эти погрешности возникают из-за приближенного (упрощенного) выполнения некоторых этапов, а иногда некоторыми расчетами пренебрегают, полагаясь на «коэффициенты запаса». Но с ними можно не угадать, особенно в проектных настройках балансировочной арматуры. С насосом это может повлечь повышенный шум в трубах или ощутимую вибрацию в прилегающих к тепловому пункту помещениях. С переразмеренными приборами отопления снижается тепловой комфорт в помещениях, т. к.

более низкая температура на греющей поверхности уменьшает долю теплообмена излучением и, как следствие, радиационную температуру помещения, а конвективное тепло уходит под потолок: радиатор становится воздухонагревателем. Неоправданно увеличиваются и капитальные затраты – особенно заметно это в больших объектах.

Несмотря на всю громоздкость методики и множество входных данных, написать для расчета простейшую программу или даже сделать вычисления в Excel большого труда не составляет. Но все осложняет специфика расчета системы отопления – взаимное влияние некоторых значений, которые на разных этапах вычислений одновременно являются и данными, и результатами:

- изменение температуры теплоносителя на участках трубопроводов:  $dT_i$ ;
- температуры теплоносителя в системе в целом:  $dT(T_1-T_2)$ ;
- теплопотери трубопровода на участках:  $Q_i$ ;
- расходы теплоносителя на участках:  $G_i$ .

$dT_i$  зависит от  $Q_i$ .  $Q_i$  зависит от  $G_i$ .  $G_i$  зависит от  $dT$  и  $Q_i$ .  $dT$  зависит от  $dT_i$ . Распутать этот клубок тривиальным способом – выразить одно через другое – не получится. Приходится применять итерационный метод. При этом полученные результаты принимаются как исходные данные для следующих итераций пока не будет достигнуто их совпадение для  $dT$  и для суммарного теплового потока  $\Sigma Q$  в системе с определенной (приемлемой) точностью. Но у этого процесса высокая сходимость, поэтому погрешность в 1–2 % достигается за несколько итераций. Для максимальной точности и достоверности результатов в процессе итераций необходимо отслеживать совпадение данных и результатов не только для  $\Sigma Q$ , но и для  $Q_i$  по каждому участку трубопровода, количество которых в большом здании может достигать более 1000.

Рассмотрим возможные варианты распределения температур теплоносителя в системе отопления. За вариант 0 примем случай, когда остыванием теплоносителя в трубах пренебрегают.

**Вариант 1.** Распределение температур в системе при условии обеспечения расхода теплоносителя с учетом дополнительной величины бесполезных теплопотерь трубопроводами (см. рис. 3). При этом расчетные температуры  $T_1-T_2$  заданы на источнике тепловой энергии (ИТЭ). У потребителя тепловой энергии (ПТЭ) их необходимо вычислить.

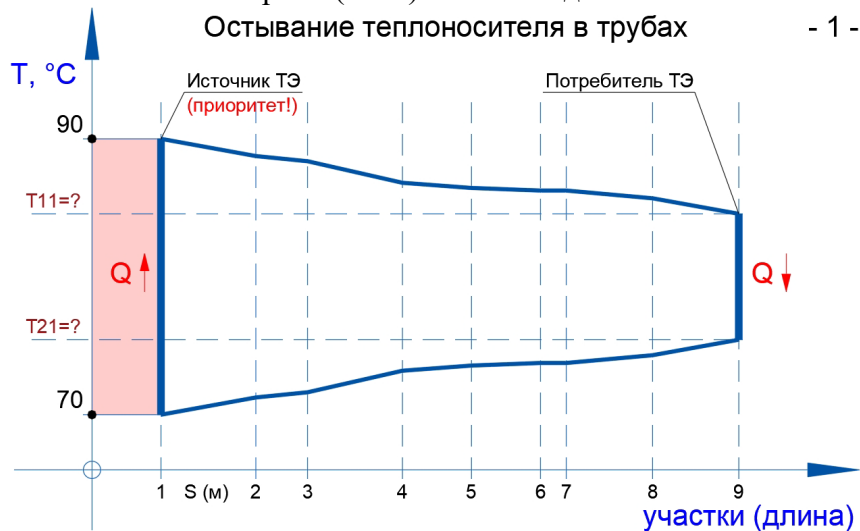


Рис. 3.

В этом варианте все подборы приборов отопления в двухтрубной системе (с симметричной подающей и обратной частями трубопроводов) остаются приемлемыми в сравнении с вариантом 0, т. к. средняя температура теплоносителя у приборов отопления падает не существенно и близка к «эталонным» 80 °C. Так, в примере системы отопления 1 для  $Q_1$ : 79,69 °C,  $Q_2$ : 79,56 °C,  $Q_3$ : 79,39 °C,  $Q_4$ : 79,45 °C. А повышенные расходы теплоносителя не оказывают ощутимого влияния на теплоотдачу радиаторов. Хотя в реальных

примерах могут быть исключения (несимметричные, смешанные системы и т. д.).

**Вариант 2.** Распределение температур в системе, если расчетные температуры  $T_1-T_2$  заданы у ПТЭ (см. рис. 4). На ИТЭ их необходимо вычислить.

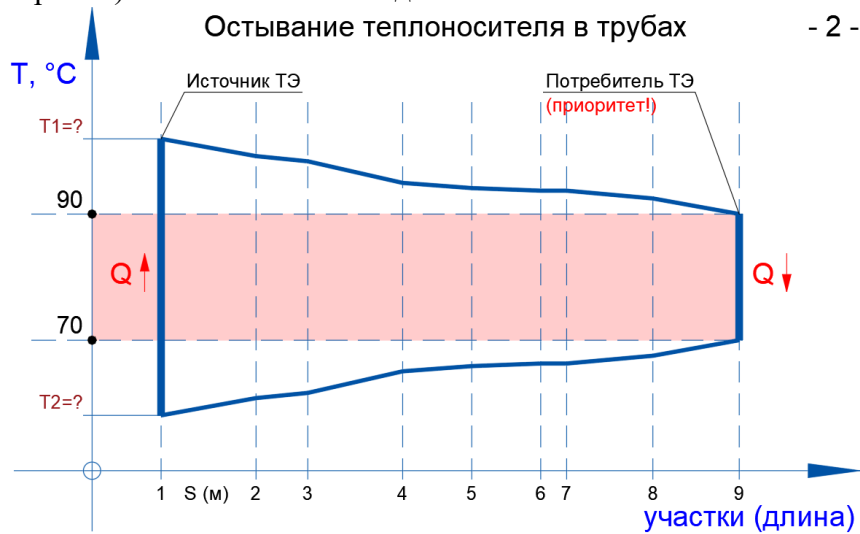


Рис. 4.

Здесь также подборы приборов отопления практически совпадают с вариантом 0. Этот вариант актуален для тепловых сетей, когда необходимо обеспечить определенные температуры подающего и обратного теплоносителя у абонентов.

**Вариант 3.** Распределение температур в системе, если задана температура  $T_1$  на ИТЭ, а также расчетный перепад температур у ПТЭ (см. рис. 5). Температуру  $T_2$  на ИТЭ следует вычислить. Также необходимо определить температуры у ПТЭ.

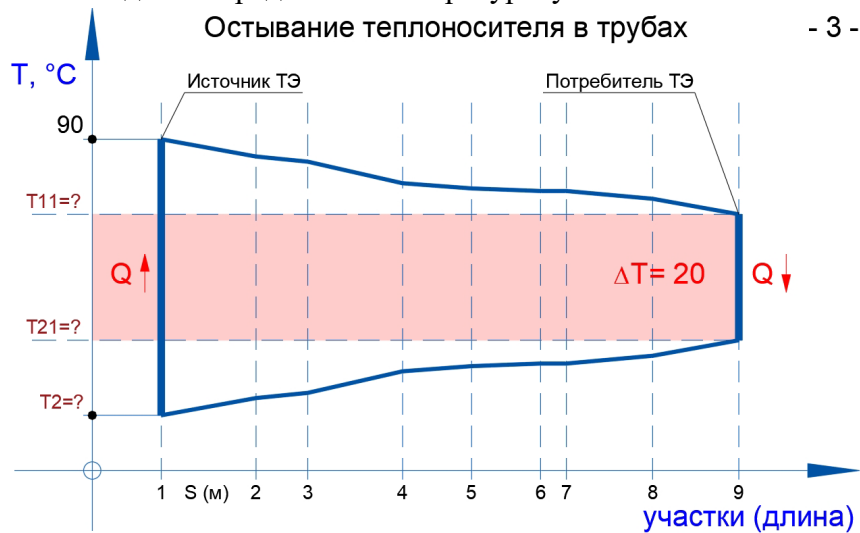


Рис. 5.

Этот вариант показывает распределение температур в системе, когда в варианте 1 расход теплоносителя оставлен таким же как в варианте 0. Последствия: сильное падение средней температуры в системе, критическое снижение теплоотдачи приборов отопления и температур воздуха во всех помещениях.

**Вариант 4.** Распределение температур в системе, если задана температура обратного теплоносителя  $T_2$  на ИТЭ, а также расчетный перепад температур у ПТЭ (см. рис. 6). Температуру подающего теплоносителя  $T_1$  на ИТЭ следует вычислить. Также необходимо определить температуры у ПТЭ.

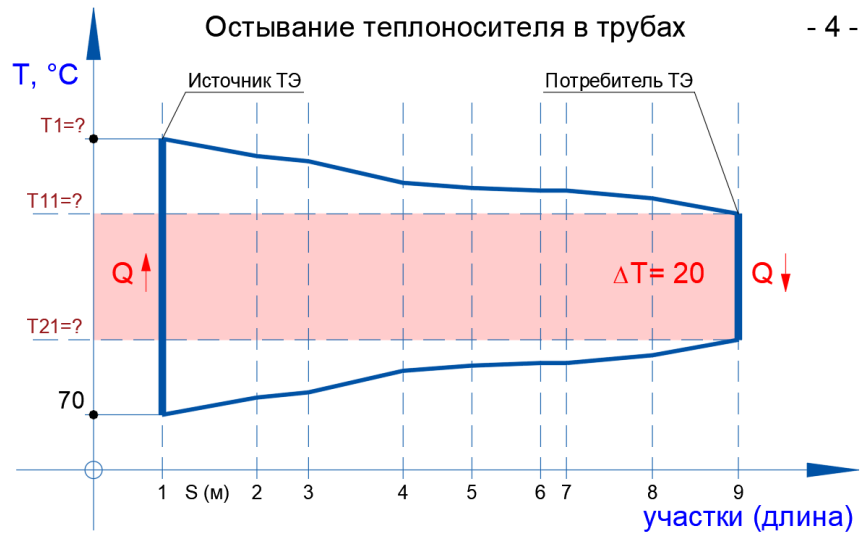


Рис. 6.

Этот вариант актуален для теплоснабжения некоторых технологических потребителей или из-за особенностей тепловой схемы в ИТЭ.

### Примеры расчета простейших систем отопления.

В качестве «испытываемых» для расчета распределения температур на участках возьмем две простейшие системы отопления.

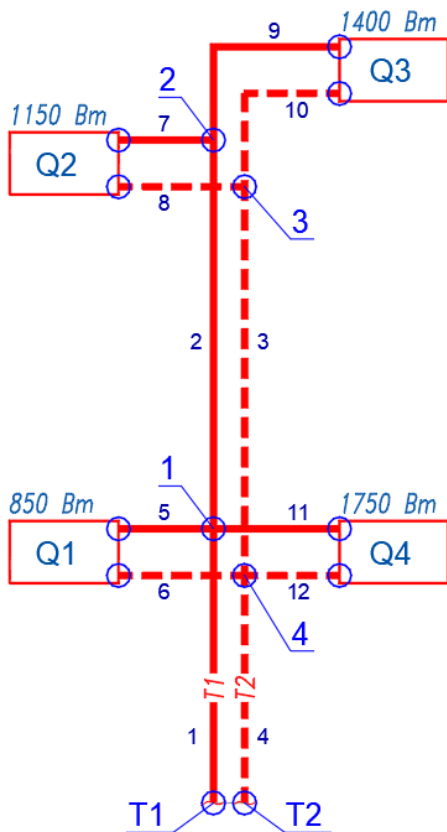


Рис. 7.

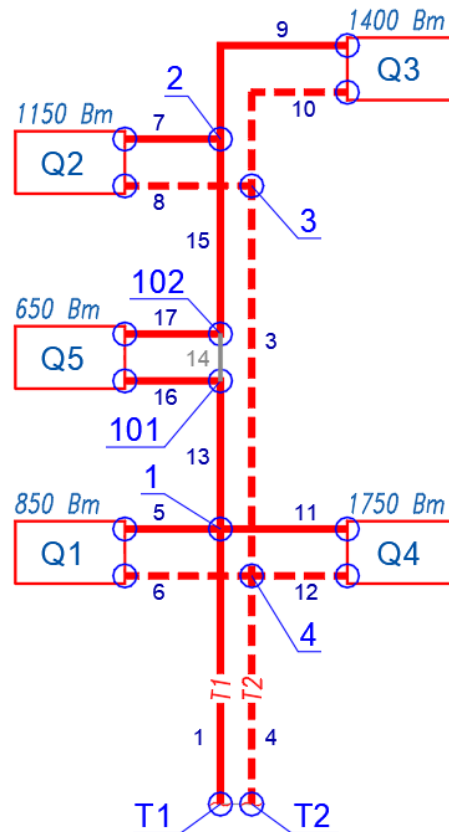


Рис. 8.

Система отопления 1 (рис. 7) является обычной двухтрубной, строго симметричной системой с полностью одинаковыми длинами подающей и обратной частей.

Система отопления 2 (рис. 8) отличается от системы 1 только лишь тем, что врезан еще один прибор отопления Q5, причем в транзитный подающий трубопровод (T1) по однотрубной проточной схеме. Понятно, что это несколько ухудшит работу радиаторов Q2 и Q3. Посмотрим

насколько работоспособно такое решение. Отметим также, что радиаторы Q2 и Q3 при этом становятся уже однетрубными проточными. Каждый совместно с радиатором Q5 составляет проточную часть системы.

В обеих системах участки 1, 4, 7, 8 теплоизолированы минеральной ватой,  $\lambda = 0,044$  Вт/(м°C), толщиной изоляции 40 мм для уч. 1, 4 и 30 мм для уч. 7, 8.

Примеры рассчитаны в программе «СигмаКАД». Основные результаты расчета сведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Результаты расчета остывания теплоносителя на участках системы отопления 1

№ уч.	Шифр	Длина, м	$\frac{D \times S}{D_n}$ , мм	$Q_{по}$ , Вт	$Q_{тр.}$ , Вт	$\Sigma Q$ , Вт	$G$ , кг/ч	$w$ , м/с	$T_1 - T_2$ , °C	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	T1-1	22	$\frac{26,8 \times 2,8}{20}$	5150	309	3444	473,7	0,3835	90,00–89,44	теплоизол., 40 мм
2	1-2	6,5	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	2550	535	1822	245,2	0,3619	89,44–87,56	
3	3-4	6,5	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	2550	374	1822	245,2	0,3619	71,71–70,41	
4	4-T2	22	$\frac{26,8 \times 2,8}{20}$	5150	225	3444	473,7	0,3835	70,41–70,00	теплоизол., 40 мм
5	1-Q1	2	$\frac{16,2 \times 2,6}{16}$	850	112	296	58,0	0,1744	89,44–87,77	труба Rehau-stabil
6	Q1-4	2	$\frac{16,2 \times 2,6}{16}$	850	79	296	58,0	0,1744	71,58–70,41	труба Rehau-stabil
7	2-Q2	6	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	1150	82	815	103,4	0,1526	87,56–86,87	теплоизол., 30 мм
8	Q2-3	6	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	1150	64	815	103,4	0,1526	72,24–71,71	теплоизол., 30 мм
9	2-Q3	4	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	1400	316	1007	141,9	0,2094	87,56–85,64	
10	Q3-3	4	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	1400	237	1007	141,9	0,2094	73,14–71,71	
11	1-Q4	8	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	1750	648	1326	170,5	0,2516	89,44–86,16	
12	Q4-4	8	$\frac{21,3 \times 2,8}{15}$	1750	465	1326	170,5	0,2516	72,74–70,41	

Таблица 3  
Основные результаты расчета системы отопления 1

№ п.п.	Параметры системы отопления	Вар. 0	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4
1	2	3	4	5	6	7
1	Температуры теплоносителя на ИТЭ (в расчетном ПТЭ), °С	90–70 (90–70)	90–70 (85,64–73,14)	101,03–66,88 (90–70)	90–58,37 (80,74–60,74)	105,01–70,45 (93,75–73,75)
2	Средняя температура теплоносителя в системе, °С	80	79,39	83,96	74,19	87,73
3	Суммарные теплотери, $Q_{пр.} + Q_{тр.}$ , Вт	5150	8594	8778	8139	9063
4	Суммарные теплотери трубопроводов, $Q_{тр.}$ , Вт (% от $Q_{пр.}$ )	0	3444 (40,08)	3628 (41,33)	2989 (36,73)	3913 (43,18)
5	Расход теплоносителя, кг/ч	221,3	473,7	220,6	221,5	231,0

Таблица 4  
Основные результаты расчета системы отопления 2

№ п.п.	Параметры системы отопления	Вар. 0	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4
1	2	3	4	5	6	7
1	Температуры теплоносителя на ИТЭ (в расчетном ПТЭ), °С	90–70 (90–70)	90–70 (83,36–72,63)	104,52–68,22 (90–70)	90–57,12 (78,06–58,06)	106,62–70,13 (92,0–72,0)
2	Средняя температура теплоносителя в системе, °С	80	77,99	86,37	73,56	88,37
3	Суммарные теплотери, $Q_{пр.} + Q_{тр.}$ , Вт	5800	9385	9751	8881	9917
4	Суммарные теплотери трубопроводов, $Q_{тр.}$ , Вт (% от $Q_{пр.}$ )	0	3584 (38,20)	3951 (40,52)	3081 (34,69)	4117 (41,52)
6	Расход теплоносителя, кг/ч	249,3	521,8	232,2	234,9	238,2

Для системы отопления 1 дополнительно вычислено падение теплоотдачи чугунных секционных радиаторов (по методике [3], стр. 43) из секций 2К60П для варианта 3 в сравнении с вариантом 0 (см. табл. 5). Подключение радиаторов принято «снизу-вниз»:  $p = 0,15$ ;  $n = 0,08$ ;  $c = 1$  (табл. 9.2, [3]). Но здесь следует иметь ввиду, что в данном расчете определения теплотерь трубопроводами полезная их часть никак не учитывалась, а она в каком-то количестве будет присутствовать, например, на открытых подводках к приборам отопления.



Таблица 5

Падение теплоотдачи радиаторов в системе отопления 1

№ п.п.	Параметры системы отопления	Вар. 0	Вар. 3, радиаторы:			
			Q1	Q2	Q3	Q4
1	2	3	4	5	6	7
1	Температура теплоносителя в патрубках радиатора, $T_1 - T_2$ , °С	90–70	85,73–65,73	83,50–63,50	80,74–60,74	82,07–62,07
2	Средняя температура теплоносителя в патрубках радиаторов, °С	80	75,73	73,50	70,74	72,07
3	Требуемая теплоотдача радиатора, Вт		850	1150	1400	1750
4	Расчетное число секций для Вар. 0/3, шт. ( $Q_{ном.} = 126 \text{ Вт/секц.}$ )*		9/10	13/15	15/18	18/21
5	Расчетная теплоотдача радиаторов при температурах Вар. 0/3, Вт		821/756	1215/1069	1425/1191	1740/1485
6	Падение теплоотдачи для Вар. 3 по сравнению с Вар. 0, %		7,88	11,96	16,98	14,62
7	Дефицит теплоотдачи, %	~0	10,99	6,95	15,52	15,04
8	Расчетная температура в помещении, °С ( $T_{нар.возд.} = -24$ °С)	~18	13,39	15,08	11,48	11,69

\* 2К60П – радиатор чугунный секционный отопительный (ГОСТ 8690-94).

### Выводы

1. Снижение параметров теплоносителя по длине трубопроводов может оказывать существенное влияние на подбор приборов отопления, особенно, если есть жесткие требования дизайнера или заказчика по максимально скрытой прокладке труб. В некоторых случаях для компенсации тепловпотерь трубопроводами требуется существенно увеличивать типоразмеры оборудования в ИТП: мощность теплообменников систем отопления, а также расход теплоносителя циркуляционных насосов. Для приведенной системы отопления расход теплоносителя следует увеличить с 221,5 до 473,7 кг/ч. Иначе распределение температур в трубопроводах будет как в варианте 3, и как следствие – уменьшение теплоотдачи приборов отопления, недостаточный нагрев помещений (см. табл. 5).

2. Большое значение имеет тепловая изоляция всех транзитных участков, особенно малых диаметров и (или) с низкой скоростью теплоносителя (см. табл. 1). Наиболее критичные места прокладки труб: подвалы, шахты, ниши, особенно примыкающие к наружным ограждающим конструкциям. Наиболее критичные участки с малыми скоростями теплоносителя:

- длинные подводки к приборам отопления;
- распределительные (поэтажные) трубопроводы к поквартирным узлам учета, а также от узлов учета до входа в квартиры, как правило, проложенные в подготовке пола коридоров;
- протяженные транзитные трубопроводы диаметром до 50 мм.

3. Падение температуры теплоносителя в трубопроводе увеличивается с уменьшением скорости теплоносителя в нем. Поэтому при стремлении уменьшить гидравлическое

сопротивление трубопроводов системы отопления путем снижения скоростей теплоносителя (увеличения диаметров) следует находить приемлемый баланс, особенно в варианте 1, в котором от теплопотерь трубопровода также зависит расход теплоносителя, а следовательно, скорости и потери давления на участках.

4. Теплопотери трубопроводов могут достигать 40 % от суммарной нагрузки системы отопления. Если их не учитывать, то скорее всего это останется без последствий, т. к. часть тепла все-таки участвует в отоплении помещений, а зимой редко температуры наружного воздуха приближаются к расчетным, да и запасы даются почти во всех подборках основного оборудования: теплообменниках, насосах и приборах отопления. Слабым местом здесь скорее является балансировочная арматура, в подбор и настройки которой вносятся существенные погрешности, которые могут как взаимно уничтожаться, так и складываться (накапливаться), и тут уж как повезет. Может получиться так: слишком большой запас – очевидное завышение сметной стоимости, недостаточный – жалобы и проблемы.

5. Максимально точный учет теплопотерь трубопроводами и мероприятия по их тепловой изоляции еще более важны для тепловых сетей, с их протяженностью и диаметрами. Ведь все потери тепла там очевидно бесполезны.

6. Расчет распределения температур в системе отопления 2 показывает, что такое подключение радиатора Q5, с небольшой мощностью, не оказывает критического влияния на работоспособность других радиаторов и системы в целом. Хотя для возможности регулировки теплоотдачи его все-таки следует подключить через замыкающий участок № 14.

### **Литература**

1. Баскаков А. П., Берг Б. В., Витт О. К. и др. Теплотехника: учебник для вузов / под ред. А. П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Теплотехнический справочник. В 2-х т. Т. 2 / под общ. ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1976.
3. Богословский В. Н., Крупнов Б. А., Сканава А. Н. и др. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч.1. Отопление / под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.: ил. (Справочник проектировщика).