

Анализ состояния систем отопления зданий при различных возмущающих воздействиях

С.А. Байбаков, заведующий лабораторией теплофикации,
Отделение турбинных установок и теплофикации,
ОАО «Всероссийский теплотехнический институт» (ВТИ), г. Москва

Рассматриваемая проблема

Основной задачей регулирования отпуска тепла на отопление в тепловых сетях является обеспечение требуемой температуры воздуха в отапливаемых помещениях или наименьших ее отклонений от требуемого (расчетного) значения.

В действующих тепловых сетях при центральном качественном регулировании отпуска тепла, температура воды в подающей линии в каждый конкретный момент времени отличается от требуемой по температурному графику в соответствии с текущей температурой наружного воздуха. Это связано с использованием диспетчерского графика (по средней температуре наружного воздуха за 12-24 ч) и наличием заметного транспортного запаздывания, достигающего в современных крупных системах централизованного теплоснабжения (ЦТ) нескольких часов.

При наличии регуляторов нагрузки по отоплению (температуры во внутреннем контуре) для зависимого и независимого присоединения на тепловых пунктах потребителей отличие температуры в подающей линии тепловой сети от требуемой по графику большой роли не играет, поскольку при этом внутренний температурный график системы отопления обеспечивается за счет изменения расхода сетевой воды из тепловой сети (компенсация), и температура внутри отапливаемых помещений поддерживается практически постоянной.

При отсутствии указанного оборудования на температуру воздуха в помещениях оказывают влияние как отклонения температуры сетевой воды, так и ее расхода при переменных гидравлических режимах, связанных с совместным присоединением системы отопления и подогревателей ГВС. При наличии только регулятора постоянства расхода на отопление, изменения гидравлических режимов на температуру внутри отапливаемых помещений не влияют, однако остаются изменения, связанные с несоответствием температуры в подающей линии тепловой сети температуре наружного воздуха в каждый момент времени. Такие условия характерны, в первую очередь, для систем отопления, присоединяемых к тепловой сети по зависимой схеме с элеваторным смешением.

При отсутствии регулирования, к системам отопления должны быть предъявлены требования по повышению тепловой устойчивости, связан-

ной как с повышением качества наружных ограждений (стен), так и с конструктивными параметрами самих систем отопления. Под теплоустойчивостью наружных ограждений принято понимать их способность гашения проходящих через ограждения температурных волн (снижение их амплитуды). Теплоустойчивость является динамической величиной, связанной с изменением температур во времени.

Под статической тепловой устойчивостью систем отопления будем в дальнейшем понимать величину изменения состояния системы, определяемую по температуре воздуха в помещениях в зависимости от различных возмущающих факторов при продолжительном их воздействии.

Условия сопоставления

Для оценки влияния на статическую тепловую устойчивость конструктивных особенностей систем отопления с зависимым присоединением при различных возмущающих воздействиях со стороны окружающей среды и тепловой сети, были проведены расчеты систем отопления с последующим сопоставлением полученных результатов. Рассматривались следующие возмущающие воздействия, принимаемые в виде отклонений параметров от текущих балансовых условий для различных температур наружного воздуха:

- по температуре наружного воздуха ± 6 °С;
- по температуре воды в подающей линии тепловой сети ± 6 °С;
- по расходу воды из тепловой сети ± 6 т/ч.

Расчеты проводились для двух вариантов изменения конструкции системы отопления и ее элементов при одинаковой величине расчетной нагрузки.

В первом варианте рассматривались системы отопления при различных температурных графиках из тепловой сети и одинаковом температурном графике на отопительных приборах (во внутреннем контуре отопления). В расчетах был принят наиболее распространенный внутренний график отопления 95/70 °С. Рассматривались также три температурных графика во внешней сети: 130/70, 150/70 и 170/70 °С. При этих условиях системы отопления отличаются только коэффициентами смешения элеваторов отопления, которые составляют 1,4, 2,2 и 3 соответственно.

Во втором варианте при принятом температурном графике тепловой сети 150/70 °С рассматривались системы отопления с различными температурными графиками на отопительных приборах: 85/70, 95/70 и 105/70 °С. Принятые условия соответствуют разным поверхностям нагрева батарей, отвечающим различному среднему температурному напору отопительных приборов при различных расходах воды во внутреннем контуре отопления. При этом меняются также и коэффициенты смешения элеваторов, которые составляли для приведенных выше графиков 4,33, 2,2 и 1,29 соответственно.

Для оценки влияния на величину изменений внутренней температуры уровня балансового состояния расчеты проводились для двух предельных для отопления температур наружного воздуха: +8 (окончание отопительного периода) и -26 °С (расчетное значение). Для температуры наружного воздуха +8 °С расчет систем отопления проводился по чисто отопительному графику, без учета его излома по условиям присоединения нагрузки ГВС.

Сопоставление результатов проводилось путем сравнения полученной величины отклонений внутренней температуры для рассматриваемых систем отопления с различными свойствами при указанных выше возмущениях.

Заданными и расчетными параметрами систем отопления являются: t_n^p – расчетная температура наружного воздуха, равная -26 °С; t_b^p – расчетная температура воздуха внутри отапливаемых помещений, равная 18 °С; Q_o^p – расчетная тепловая нагрузка системы отопления, равная 1 Гкал/ч; G_o^p – расчетный расход воды из тепловой сети – в зависимости от графика сети, т/ч; τ_1^p – расчетная температура воды в подающей линии тепловой сети – в зависимости от условий, °С; τ_2^p – расчетная температура воды в обратной линии тепловой сети, равная 70 °С; τ_{o1}^p – расчетная температура воды в подающей линии перед отопительной установкой – в зависимости от условий, °С; u^p – расчетный коэффициент смешения – в зависимости от условий; Δt_o^p – расчетная разность температур отопительных приборов (воды и воздуха в помещении) – в зависимости от условий, °С.

Методика расчетов

Для решения поставленных задач по сопоставлению отклонений температуры внутри помещения при различных температурных графиках для систем отопления и тепловых сетей используются следующие формулы и уравнения теплового баланса, учитывающие условия теплоотдачи от отопительных приборов к воздуху в помещениях, и от этого воздуха к окружающей среде через наружные ограждения.

1. Тепловая нагрузка в системе отопления в зависимости от текущей температуры наружно-

го воздуха и воздуха внутри отапливаемых помещений:

$$Q_o = Q_o^p \cdot [(t_b^{pT} - t_n) / (t_b^p - t_n^p)],$$

где t_b^{pT} – расчетно-текущая температура воздуха внутри отапливаемых помещений, °С.

2. Формула теплового баланса системы отопления по сетевой воде:

$$Q_o = G_o \cdot (\tau_1 - \tau_2),$$

где G_o – расход воды в системе отопления, т/ч; τ_1 – температура воды в подающей линии тепловой сети, °С; τ_2 – температура воды в обратной линии тепловой сети, °С.

3. Формула уравнения теплового баланса по отопительным приборам:

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot G_o \cdot (\tau_1 - t_b),$$

где ε_o – безразмерная удельная отопительная характеристика отопления, равная

$$\varepsilon_o = 1 / [(0,5 + u^p) / (1 + u^p) + \Delta t_o^p \cdot G_o / (1000 \cdot (Q_o^p)^{1-m} \cdot Q_o^m)].$$

4. Расчетный коэффициент смешения элеватора: $u^p = (\tau_1^p - \tau_{o1}^p) / (\tau_{o1}^p - \tau_2^p)$.

Полученные результаты

При расчетах по вышеуказанным формулам были получены приведенные ниже результаты по оценке величины статической тепловой устойчивости систем отопления.

Для различных температурных графиков во внешней тепловой сети.

При расчете отклонений температуры воздуха внутри помещений здания Δt_b и изменений параметров от текущих балансовых условий при текущих температурах наружного воздуха t_n , равной -26 °С (расчетное значение) и +8 °С (окончание отопительного периода) и расчетной температуре воды в подающей линии τ_1^p , составляющей 130, 150 и 170 °С, были получены результаты, приведенные в табл. 1.

В этой таблице для каждого возмущения (Δt_n , $\Delta \tau_1$ и ΔG_o соответственно) при рассматриваемых наружных температурах приведены:

- абсолютные изменения температуры воздуха в помещениях;
- относительные изменения температуры воздуха в помещениях на единицу возмущающего воздействия в абсолютном виде;
- относительные изменения температуры воздуха на единицу возмущения, выраженного в виде отклонения по тепловой нагрузке в Гкал/ч при этом возмущении.

Последние две позиции в таблице необходимы для сравнительной оценки результатов возмущений, приведенных к одинаковым условиям по изменению отпуска тепла.

Из табл. 1 следует, что наиболее значимые изменения теплового состояния как по абсолютной величине, так и по их величине, отнесенной к возмущению, выраженному в виде тепловой энергии, имеют место при возмущениях по рас-

Таблица 1. Результаты расчетов отклонений температуры внутри помещений для различных температурных графиков тепловой сети.

Условия		$t_{н1}=-26\text{ }^{\circ}\text{C}$						$t_{н2}=+8\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Графики теплосети		130/70 $^{\circ}\text{C}$		150/70 $^{\circ}\text{C}$		170/70 $^{\circ}\text{C}$		130/70 $^{\circ}\text{C}$		150/70 $^{\circ}\text{C}$		170/70 $^{\circ}\text{C}$	
Возмущения по температуре наружного воздуха	$\Delta t_{н},\text{ }^{\circ}\text{C}$	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6
	$\Delta t_{в},\text{ }^{\circ}\text{C}$	4,16	-4,15	4,38	-4,38	4,56	-4,56	4,37	-4,35	4,55	-4,53	4,69	-4,68
	$\Delta t_{в}/\Delta t_{н}$	0,693	0,692	0,73	0,73	0,76	0,76	0,728	0,725	0,758	0,755	0,782	0,78
	$\Delta t_{в}/\Delta Q_{о}$	30,59	30,51	32,21	32,21	33,53	33,53	32,13	31,99	33,46	33,31	34,49	34,41
Возмущения по температуре сетевой воды	$\Delta \tau_{1},\text{ }^{\circ}\text{C}$	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6
	$\Delta t_{в},\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,85	-1,84	1,62	-1,62	1,44	-1,44	1,65	-1,63	1,47	-1,45	1,32	-1,31
	$\Delta t_{в}/\Delta \tau_{1}$	0,308	0,307	0,27	0,27	0,24	0,24	0,275	0,272	0,245	0,242	0,22	0,218
	$\Delta t_{в}/\Delta Q_{о}$	18,5	18,4	21,6	21,6	24,0	24,0	16,5	16,3	19,6	19,33	22,0	21,83
Возмущения по расходу воды в системе отопления	$\Delta G_{о},\text{ т/ч}$	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6
	$\Delta t_{в},\text{ }^{\circ}\text{C}$	11,25	-13,74	15,26	-19,26	19,33	-24,98	2,76	-3,27	3,71	-4,52	4,66	-5,81
	$\Delta t_{в}/\Delta G_{о}$	1,875	2,29	2,543	3,21	3,222	4,163	0,46	0,545	0,618	0,753	0,777	0,968
	$\Delta t_{в}/\Delta Q_{о}$	31,25	38,17	31,79	40,13	32,22	41,63	33,72	39,96	33,99	41,41	34,17	42,6

ходу воды $\Delta G_{о}$, особенно для условий снижения его величины. Следующими по степени влияния являются возмущения по температуре наружного воздуха $\Delta t_{н}$, и наименьшее относительное влияние имеют возмущения по температуре в подающей линии $\Delta \tau_{1}$. То есть для обеспечения стабильных условий по состоянию отапливаемых помещений, в первую очередь, необходимо обеспечить требуемый расход воды на отопление за счет, как минимум, установки регулятора расхода.

Следует отметить, что снижение расхода воды на 6 т/ч требует применения других методов расчета систем отопления, однако для оценки ситуации в целом достаточно и приведенных данных.

1. Возмущения по температуре наружного воздуха. При отклонении температуры наружного воздуха $\Delta t_{н}$ от балансового значения $t_{н}$ для постоянной температуры сетевой воды и расхода на отопление (возмущения со стороны окружающей среды), абсолютные изменения температуры воздуха в помещении практически не зависят от знака $\Delta t_{н}$ и возрастают с увеличением температурного графика, т.е. большей тепловой устойчивостью обладают системы отопления с более низким температурным графиком. Аналогичное положение имеет место и по относительным изменениям внутренней температуры.

Максимальное увеличение абсолютного отклонения внутренней температуры при переходе от графика 130/70 $^{\circ}\text{C}$ к графику 170/70 $^{\circ}\text{C}$ составляет 9,6% при температуре наружного воздуха -26 $^{\circ}\text{C}$ и уменьшается до 7,1% при балансовой температуре +8 $^{\circ}\text{C}$.

Максимальное увеличение относительного (отнесенного к единице возмущающего воздействия в виде тепловой энергии) изменения при общем увеличении графика составляет также 9,6% при расчетной наружной температуре и

снижается соответственно до 7,1% при температуре +8 $^{\circ}\text{C}$.

Величина абсолютных и относительных отклонений внутренней температуры при одном и том же температурном графике более значима при высоких температурах наружного воздуха.

2. Возмущения по температуре в подающей линии. При отклонении температуры сетевой воды $\Delta \tau_{1}$ от рассматриваемых балансовых значений τ_{1} при постоянной температуре наружного воздуха и расходе на отопление (возмущения по температуре воды в подающей линии), изменения температуры в помещении практически не зависят от знака $\Delta \tau_{1}$ и снижаются с увеличением температурного графика.

Максимальное абсолютное снижение величины отклонений температуры внутри помещений при переходе от графика 130/70 $^{\circ}\text{C}$ к графику 170/70 $^{\circ}\text{C}$ составляет -22,2% при температуре наружного воздуха -26 $^{\circ}\text{C}$ и уменьшается до -20% при балансовой температуре +8 $^{\circ}\text{C}$, т.е. влияние возмущений по подающей температуре при ее изменении на одну и ту же величину также более значимо при низких температурах наружного воздуха.

При оценке по относительным отклонениям (отнесенным к величине возмущения в виде тепловой нагрузки) получаем противоположную картину, поскольку одна и та же величина возмущения по температуре в подающей линии эквивалентна различному количеству тепла. Относительные отклонения являются наибольшими при высоких температурных графиках. Максимальное снижение относительной величины отклонения при переходе на более высокий график при расчетной температуре наружного воздуха (-26 $^{\circ}\text{C}$) составляет 29,7%. При температуре наружного воздуха +8 $^{\circ}\text{C}$ изменение относительного отклонения увеличивается до 33,3%. Другими словами, тепловая устойчивость системы отоп-

Таблица 2. Результаты расчетов отклонений температуры внутри помещений для различных температурных графиков систем отопления.

Условия		$t_{н1}=-26\text{ }^{\circ}\text{C}$						$t_{н2}=+8\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Графики теплосети		85/70 $^{\circ}\text{C}$		95/70 $^{\circ}\text{C}$		105/70 $^{\circ}\text{C}$		85/70 $^{\circ}\text{C}$		95/70 $^{\circ}\text{C}$		105/70 $^{\circ}\text{C}$	
Возмущения по температуре наружного воздуха	$\Delta t_{н}$, $^{\circ}\text{C}$	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6
	$\Delta t_{в}$, $^{\circ}\text{C}$	4,39	-4,39	4,38	-4,38	4,37	-4,37	4,55	-4,53	4,55	-4,53	4,55	-4,54
	$\Delta t_{в}/\Delta t_{н}$	0,732	0,732	0,73	0,73	0,728	0,728	0,758	0,755	0,758	0,755	0,758	0,757
	$\Delta t_{в}/\Delta Q_{о}$	32,28	32,28	32,21	32,21	32,13	32,13	33,46	33,31	33,46	33,31	33,46	33,38
Возмущения по температуре сетевой воды	Δt_{1} , $^{\circ}\text{C}$	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6
	$\Delta t_{в}$, $^{\circ}\text{C}$	1,61	-1,61	1,62	-1,62	1,63	-1,63	1,47	-1,45	1,47	-1,45	1,46	-1,45
	$\Delta t_{в}/\Delta t_{1}$	0,268	0,268	0,27	0,27	0,272	0,272	0,245	0,242	0,245	0,242	0,243	0,242
	$\Delta t_{в}/\Delta Q_{о}$	21,47	21,47	21,60	21,60	21,73	21,73	19,60	19,33	19,6	19,33	19,47	19,33
Возмущения по расходу воды в системе отопления	$\Delta G_{о}$, т/ч	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6	+6	-6
	$\Delta t_{в}$, $^{\circ}\text{C}$	15,17	-19,16	15,26	-19,26	15,36	-19,36	3,67	-4,49	3,71	-4,52	3,74	-4,55
	$\Delta t_{в}/\Delta G_{о}$	2,528	3,193	2,543	3,21	2,56	3,227	0,612	0,748	0,618	0,753	0,623	0,758
	$\Delta t_{в}/\Delta Q_{о}$	31,6	39,92	31,79	40,13	32,0	40,33	33,65	41,16	33,72	41,41	34,29	41,71

ления при переходе на более высокий график снижается при одинаковых по приведенным к тепловой нагрузке возмущениях по температуре сетевой воды.

3. Возмущения по расходу воды на отопление. При отклонении расхода сетевой воды $\Delta G_{о}$ от рассматриваемых балансовых значений $G_{о}$ для постоянных температур наружного воздуха и воды в подающей линии сети (возмущения по расходу воды на отопление), изменения температуры в помещении в значительной степени зависят от знака $\Delta G_{о}$. Повышение температуры воздуха в помещениях при увеличении расхода воды примерно на 20-30% меньше ее снижения при уменьшении подачи воды. Функция зависимости подачи тепла на отопление от расхода воды является нелинейной и различной при разных температурах наружного воздуха. Поэтому анализ устойчивости проводится отдельно для увеличения и снижения расходов на отопление.

Для расчетной температуры наружного воздуха $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ и увеличении расхода воды на отопление абсолютное изменение увеличения температуры воздуха в помещениях $\Delta t_{в}$ возрастает при переходе от графика 130/70 $^{\circ}\text{C}$ на график 170/70 $^{\circ}\text{C}$ с 11,25 до 19,33 $^{\circ}\text{C}$ или на 71,8%. По относительным отклонениям аналогичный переход по температурным графикам приводит к увеличению этих отклонений всего на 3,1%.

При уменьшении расхода воды на ту же величину переход от более низкого температурного графика к графику 170/70 $^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению отклонений внутренней температуры с 13,74 до 24,98 $^{\circ}\text{C}$ или на 82%. По относительным величинам отклонений увеличение их значений происходит всего на 9,1%.

При температуре наружного воздуха $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ абсолютные отклонения температуры в помещениях при изменении расхода воды на отопление существенно меньше, чем при расчетной наружной

температуре и также возрастают с переходом на более высокий график. Так, при увеличении расхода воды на отопление изменение увеличения температуры воздуха в помещениях $\Delta t_{в}$ возрастает при переходе от графика 130/70 $^{\circ}\text{C}$ на график 150/70 $^{\circ}\text{C}$ с 2,76 до 4,66 $^{\circ}\text{C}$ или на 68,8%. Увеличение относительных отклонений внутренней температуры при этом составляет 1,3%.

При уменьшении расхода воды на ту же величину аналогичный переход по температурным графикам приводит к увеличению отклонений внутренней температуры с 3,27 до 5,81 $^{\circ}\text{C}$ или на 77,7%. В относительной форме увеличение отклонений составляет 6,6%.

Таким образом, устойчивость систем отопления при изменении расходов воды увеличивается при переходе на более низкий температурный график. При этом она возрастает с увеличением расхода на систему отопления, особенно при отрицательных температурах наружного воздуха.

Для различных температурных графиков систем отопления.

Здесь приведены результаты расчетов изменения состояния систем отопления при различных внутренних температурных графиках систем отопления (графиков на отопительных приборах) при одинаковом температурном графике тепловой сети.

При расчете отклонений температуры воздуха внутри помещений здания $\Delta t_{в}$ и изменений параметров от текущих балансовых условий при наиболее отличающихся температурах наружного воздуха $t_{н}$, равных $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетное значение) и $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (окончание отопительного периода) и расчетной температуре воды перед отопительными установками $t_{о1}$, составляющей 85, 95 и 105 $^{\circ}\text{C}$, были получены следующие результаты, приведенные в табл. 2. При этом температурный график тепловой сети был принят 150/70 $^{\circ}\text{C}$.

В этой таблице, также как и для предыдущего варианта, для каждого возмущения при рассматриваемых наружных температурах приведены абсолютные изменения температуры воздуха в помещениях и относительные величины изменения этих отклонений.

Как следует из данных табл. 2, изменение величины отклонений температуры воздуха в помещениях при различных возмущениях сравнительно слабо зависят от принятого температурного графика системы отопления, хотя имеется определенная тенденция.

Наиболее значимые изменения теплового состояния как по абсолютной величине, так и по их величине, отнесенной к величине возмущения, выраженного в виде тепловой энергии, имеют место при возмущениях по расходу воды ΔG_0 для условий снижения его величины. Следующими по степени влияния являются возмущения по температуре наружного воздуха Δt_n , и наименьшее относительное влияние имеют возмущения по температуре в подающей линии Δt_1 . Это требует, в первую очередь, стабилизации расхода воды на отопление за счет, как минимум, установки регулятора расхода.

1. Возмущения по температуре наружного воздуха. При отклонении температуры наружного воздуха Δt_n от балансового значения t_n изменения температуры в помещении практически не зависят от знака Δt_n и слабо уменьшаются с увеличением температурного графика, т.е. теплоустойчивость систем отопления снижается при понижении температурного графика.

Влияние одинаковых возмущений по температуре наружного воздуха более значимо при высоких температурах наружного воздуха.

2. Возмущения по температуре в подающей линии. При отклонении температуры сетевой воды Δt_1 от рассматриваемых балансовых значений t_1 абсолютные изменения температуры в помещении практически не зависят от знака Δt_1 и слабо возрастают с повышением температурного графика, т.е. теплоустойчивость систем отопления снижается при более низких температурных графиках систем отопления.

3. Возмущения по расходу воды на отопление. При отклонении расхода сетевой воды ΔG_0 от рассматриваемых балансовых значений G_0 изменения температуры в помещении также сильно зависят от знака ΔG_0 .

Как следует из табл. 2, устойчивость систем отопления при изменении расхода воды чисто теоретически увеличивается при переходе на более низкий температурный график. При этом она выше при увеличении расхода на систему отопления, особенно при отрицательных температурах наружного воздуха.

Выводы

Сопоставление отклонений температур воздуха внутри отапливаемых помещений при изменении параметров окружающей среды и в тепловой сети от начальных балансовых условий для независимо присоединенных систем отопления позволяет сделать следующие выводы.

1. Статическая тепловая устойчивость систем отопления повышается при более низких температурных графиках внешней тепловой сети при всех рассматриваемых возмущениях. Такое положение позволяет рассматривать целесообразность перехода при теплоснабжении на пониженные температурные графики с изменением условий присоединения систем отопления.

2. Устойчивость систем отопления при различных графиках на отопительных приборах (внутренние графики систем отопления) также повышается при использовании более низких графиков. Однако это повышение незначительно и носит скорее расчетный, чем практический характер.

3. Наибольшие отклонения внутренней температуры при различных температурных графиках (в тепловой сети и на отопительных приборах) и возмущениях по температуре наружного воздуха и расходу воды на отопление имеют место при положительных температурах наружного воздуха. При возмущениях по температуре в подающей линии наименьшая устойчивость соответствует низким наружным температурам.

4. При анализе по абсолютным и относительным (на единицу возмущающего воздействия, приведенного к тепловой нагрузке) отклонениям внутренней температуры наименьшая устойчивость имеет место при возмущениях по расходам воды на отопление. В соответствии с этим, наиболее значимым мероприятием с точки зрения повышения тепловой устойчивости является оснащение систем отопления регуляторами постоянства расхода.