

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ БАЛАНСИРОВКИ ОДНОТРУБНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Вступление

Данная статья является пятой из серии работ по теплогидравлическому моделированию однотрубных систем отопления, опубликованных в предыдущих выпусках журналов Данфосс INFO [1–4]. Результаты работы также докладывались на V международной научно-технической конференции МГСУ в 2013 г. [5].

Одной из основных задач обеспечения качественной услуги отопления является обеспечение комфортной температуры помещения при минимальном потреблении энергоресурсов, т. е. при минимальной плате за отопление. К снижению качества этой услуги приводит разбалансировка системы отопления. Особенно это актуально в существующих зданиях, где вмешательство потребителей в систему стало обыденным явлением. Минимизировать последствия такого вмешательства позволяет модернизация системы отопления, устраняющая разбалансировку, то есть приводящая в соответствие расходы в стояках к проектным значениям за счёт увязки давлений в циркуляционных кольцах.

Отсутствие балансировки системы не обязательно приводит к увеличению энергопотребления всего здания. Но однозначно, разбалансировка приводит к перегреву одних помещений и недогреву других. Не исключён вариант недогрева большей части помещений.

Важной задачей эффективного использования энергии системой отопления является также предотвращение сброса теплоносителя повышенной температуры в тепловую сеть. Обычно это происходит при несбалансированной системе отопления. Устранение такой проблемы системы отопления позволяет повысить КПД теплогенератора и уменьшить теплопотери в теплосети. Все это в целом позволяет получить качественную услугу «отопление» и уменьшить плату за нее.

1. Сравнение различных способов балансировки однотрубных систем отопления

1.1. Способы балансировки однотрубных систем отопления

При термомодернизации однотрубных систем водяного отопления используют четыре способа балансировки:

- способ 1. Диаметрами трубопроводов;

- способ 2. Ручными балансировочными вентилями. Они создают дополнительные потери давления в стояках не менее 3 кПа;
- способ 3. Автоматическими стабилизаторами расхода, поддерживающими постоянный заданный расход теплоносителя в стояке. Система искусственно переводится в постоянный гидравлический режим;
- способ 4. Комбинированными регуляторами расхода и температуры:
 - способ 4а. Комбинированные регуляторы прямого действия поддерживают постоянную температуру обратного теплоносителя на выходе из стояков при достаточной температуре подающего теплоносителя и ограничивают расход в стояках на уровне не больше требуемого;
 - способ 4б: электронные комбинированные регуляторы поддерживают температуру обратного теплоносителя в каждом стояке согласно заданному температурному графику и ограничивают расход в стояках на уровне не больше требуемого.

Сравнение различных способов балансировки однотрубных вертикальных систем водяного отопления с верхней разводкой выполнено в работе [3] при помощи созданной математической модели переменного теплогидравлического режима системы отопления в программе LibreOffice Calc на базе общепринятой методики теплогового и гидравлического расчёта системы отопления [6]. Было показано, что только четвёртый способ балансировки обеспечивает высокую энергоэффективность системы отопления без сброса перегретого теплоносителя в тепловую сеть при любых режимах эксплуатации здания.

Однотрубные вертикальные системы отопления с нижним расположением источника теплоты обладают свойством саморегулирования. При закрытии терморегуляторов на отопительных приборах стояка средняя температура теплоносителя в нём возрастает, снижая естественное циркуляционное давление. При этом расход теплоносителя уменьшается. Это означает, что через такой стояк транзитом сбрасывается меньше горячего теплоносителя. Увеличение сопротивления стояков (способ 2) уменьшает долю естественного давления, снижая потенциал саморегулирования. Стабилизация расхода (способ 3) исключает саморегулирование системы, увеличивая транзитный сброс горячего теплоносителя. Комбинированные

регуляторы (способ 4) исключают возможность сброса горячего теплоносителя в обратную магистраль.

В П-образных системах отопления доля естественного давления значительно меньше, чем в системах с верхней разводкой. Однако в большинстве таких систем один-два стояка выполнены с холостыми (без отопительных приборов) подъёмными (редко – опускными) частями. Такие стояки имеют отличное от других естественное давление. Сравним результаты моделирования однотрубных систем с верхней и нижней разводками подающих магистралей.

1.2. Принципы моделирования

Для анализа динамического режима работы создана математическая модель однотрубной вертикальной системы водяного отопления с нижней разводкой с П-образными стояками (рис. 1) для LibreOffice Calc. За основу принята методика [6] на базе метода характеристик сопротивления с учётом естественного давления [6] в больших и малых циркуляционных кольцах. Методика детально описана в работах [1–5].

Расчёты выполнены для двух характерных зданий:

- 6-этажное;
- 10-этажное.

Каждое здание имеет 8 П-образных стояков – по 4 на каждом фасаде. Треть полустояков (подъёмная или опускная часть П-образных стояков) проходит через кухни.

Рассмотрены три характерных режима эксплуатации здания:

- расчётный;
- один фасад освещен солнцем, и терморегуляторы отопительных приборов с соответствующего фасада закрылись;
- в кухнях происходит приготовление пищи, при котором теплотери компенсируются тепlopоступлени-

ем от плит, и терморегуляторы отопительных приборов закрылись.

1.3. Результаты моделирования системы отопления с П-образными стояками

При отсутствии автоматической балансировки стояков аналогично системе с верхней разводкой, если потери давления в стояках не отвечают требованиям [7] и составляют менее 70 % от потерь давления в циркуляционных кольцах без учета общих участков, то расчёт невозможен. Причина – высокая гидравлическая неустойчивость. Это условие в П-образной системе приводит к меньшему завышению диаметров магистралей, чем при верхней разводке, из-за большего сопротивления стояков.

Серьёзные проблемы выявлены в зданиях малой этажности с системой отопления, сбалансированной диаметрами трубопроводов, которая содержит холостые части стояков. В данном случае – 6-этажное здание. В таких стояках доля естественного давления близка к стоякам с верхней разводкой. Малое изменение расхода в них приводит к значительному изменению естественного давления, что делает расчёт и эксплуатацию системы невозможной, а гидравлический режим непредсказуемым.

В остальном, результаты моделирования (рис. 2-5, табл. 1) принципиально не отличаются от результатов расчёта систем с верхней разводкой, подробно рассмотренных в работе [3]. При 1–3 способах балансировки системы наблюдается значительное (до 65 % от перепада температур в системе) превышение температуры сбрасываемого теплоносителя в обратную магистраль. Такое превышение несколько меньше, чем при верхней разводке (до 69 %). Это происходит из-за того, что при верхней разводке через кухни проходит целый стояк, а при нижней – только его половина. Половина стояка продолжает работать в штатном режиме, что позволяет полезно использовать часть транзитного теплоносителя.

Однако такое полезное использование избыточного теплоносителя исправляет ситуацию лишь частично.

Единственным способом, исключающим транзитный сброс горячего теплоносителя в обратную магистраль, является автоматическая стабилизация температуры обратного теплоносителя (способ 4). Такой способ обеспечивает снижение расхода теплоносителя до 68 %. Саморегулирование системы позволяет уменьшить расход в П-образном стояке не более чем на 8 %, чего явно не достаточно.

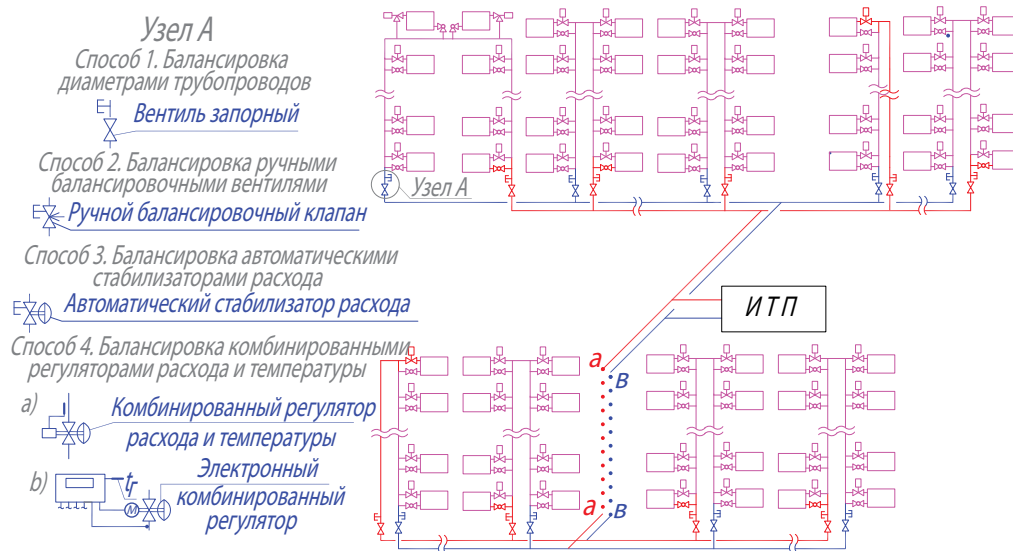
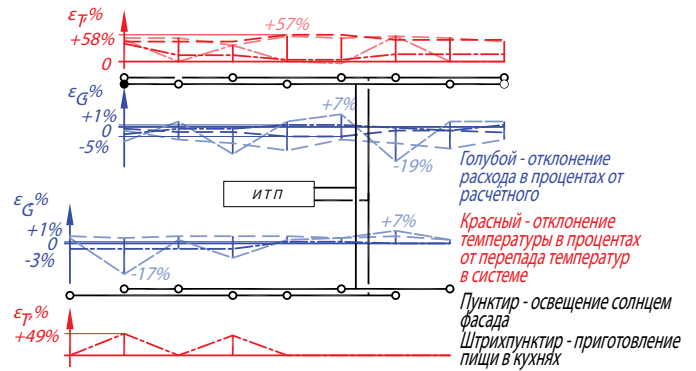


Рис. 1. Схема системы отопления

РАСЧЁТ НЕВОЗМОЖЕН



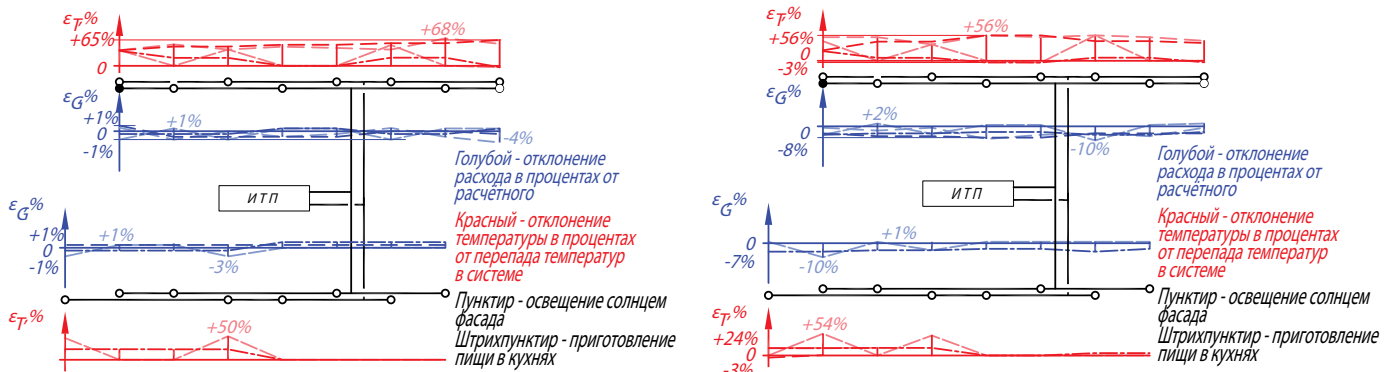
а

б

Рис. 2. Отклонение расхода и температуры обратного теплоносителя в системе отопления, сбалансированной диаметрами трубопроводов (способ 1):

а – 6-этажное здание с П-образными стояками и 12-этажное здание с верхней разводкой – расчёт невозможен;

б – 10-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 20-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии)



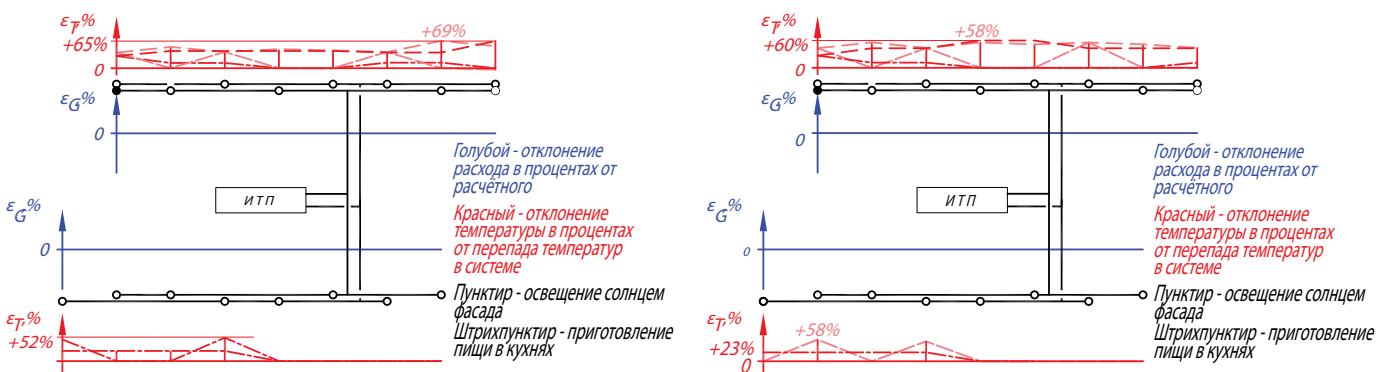
а

б

Рис. 3. Отклонение расхода и температуры обратного теплоносителя в системе отопления, сбалансированной ручными балансировочными вентилями (способ 2):

а – 6-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 12-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии);

б – 10-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 20-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии)



а

б

Рис. 4. Отклонение расхода и температуры обратного теплоносителя в системе отопления, сбалансированной автоматическими стабилизаторами расхода (способ 3):

а – 6-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 12-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии);

б – 10-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 20-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии)

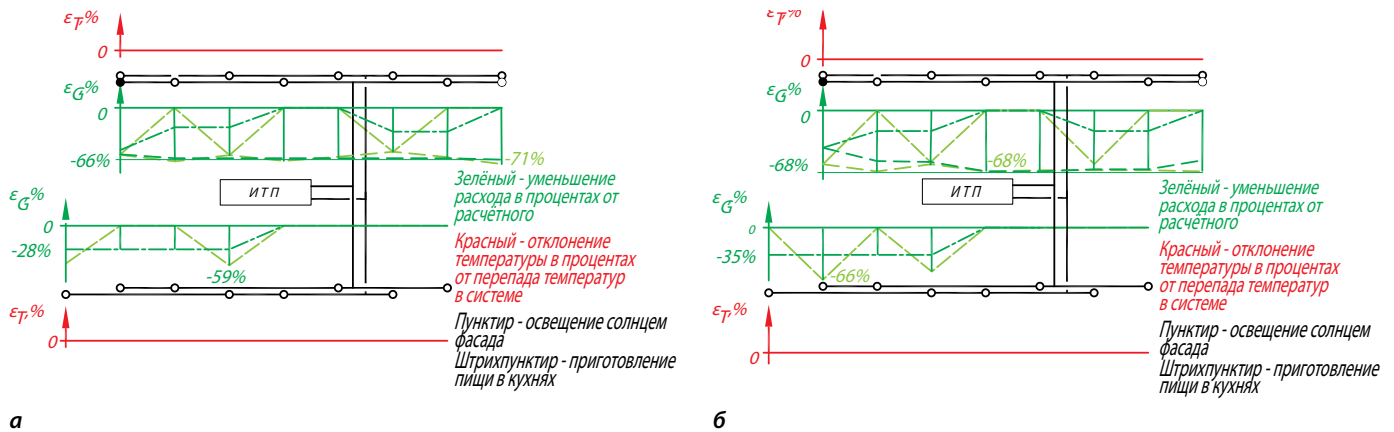


Рис. 5. Отклонение расхода и температуры обратного теплоносителя в системе, сбалансированной комбинированными регуляторами расхода и температуры (способ 4):

а – 6-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 12-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии);
 б – 10-этажное здание с П-образными стояками (яркие линии) и 20-этажное здание с верхней разводкой (бледные линии)

Таблица 1

Результаты моделирования системы отопления

Этажность	Максимальное отклонение температуры обратного теплоносителя (числитель) / расхода (знаменатель), %, при балансировке:			Максимальное отклонение температуры обратного теплоносителя (числитель) / уменьшение расхода (знаменатель), %, при балансировке комбинированными регуляторами расхода и температуры
	диаметрами	ручными балансировочными вентилями	автоматическими стабилизаторами расхода	
П-образные стояки				
10	59/5	56/8	60/0	0 / 68
6	???	65/2	65/0	0 / 66
Верхняя разводка				
20	57/19	56/10	58/0	0 / 68
12	69/23	68/4	69/0	0 / 71

2. Оценка годового теплоснабжения системы отопления при различных способах балансировки

Разработанная математическая модель позволяет сравнить различные способы балансировки систем отопления по годовому теплоснабжению. Однако на данном этапе её разработки доступна пока лишь приближённая заниженная оценка энергоэффективности, поскольку в математической модели не учитывается влияние авторитетов терморегуляторов.

Расчёт выполнен для системы отопления с верхней разводкой подающей магистрали 12-этажного здания, расположенного в г. Киеве.

Расчётные параметры: температура наружного воздуха $t_{ext} = -22$ °С, температура подаваемого теплоносителя в систему отопления $t_2 = +90$ °С, температура внутреннего воздуха $t_6 = +20$ °С. Температурный график тепловой сети принят линейным, условно сходящимся в точку $t_{ext} = t_2 = t_6 = +20$ °С. Благодаря работе электронного регулятора теплового потока по погодным условиям в индивидуальном тепловом пункте срезка температурного графика устранила. Этим двум точкам примерно

соответствует уравнение линейного температурного графика:

$$t_2 = -1,667 t_{ext} + 53,3. \quad (1)$$

Поскольку расчёты требуют значительных временных затрат, осуществлено ограничение тремя характерными температурами:

- расчётной $- t_{ext} = -22$ °С.
По формуле (1) $t_2 = -1,667 (-22) + 53,33 = 90$ °С;
- промежуточной $- t_{ext} = -10$ °С.
 $t_2 = -1,667 (-10) + 53,33 = 70$ °С;
- точкой срезки $- t_{ext} = +3,8$ °С.
 $t_2 = -1,667 (+3,8) + 53,33 = 47$ °С.

Последняя точка позволяет оценить энергоэффективность применения регулятора теплового потока по погодным условиям в индивидуальном тепловом пункте в будущих исследованиях.

В промежуточных точках теплоснабжение, Вт, оценено путём квадратичной интерполяции результатов:

$$Q = a t_{ext}^2 + b t_{ext} + c. \quad (2)$$

Размерные коэффициенты a , b и c определяются из решения системы уравнений (2), записанных для трёх характерных температур. Соответствующее теплотребление системы Q , Вт, вводится по результатам моделирования системы (табл. 2).

Для расчёта годового теплотребления использованы данные [8] количества часов z_i стояния различных диапазонов температур. Число часов дополнительно распределяется между различными режимами работы системы. Принято время приготовления пищи в кухнях в среднем 2 часа в сутки (по 1 часу утром и вечером). Время освещения фасада солнцем принято 0...4 часа в сутки. При этом больший период времени соответствует большей температуре наружного воздуха. Считаем, что оставшееся время система отопления работает со 100 % нагрузкой. Таким образом, получены интервалы времени z_i работы системы при каждом режиме в каждом диапазоне температур. Для приближенного расчета годового теплотребления рассчитано теплотребление системы Q_i в каждом режиме при среднем значении в каждом диапазоне.

Годовое теплотребление в кВт·ч / год:

$$Q_{год} \approx \sum Q_i z_i / 1000. \quad (3)$$

Полученные данные (табл. 3) подтверждают, что существенную годовую экономию энергии обеспечивают исключительно комбинированные регуляторы расхода и температуры (более 10 %). Другие способы балансировки обеспечивают практически одинаковое теплотребление.

По результатам моделирования, включая [1–5], появляется возможность оценки соответствия различных способов балансировки требованиям, выдвигаемым к системам отопления (табл. 4).

Выводы

1. Влияние балансировки на работу системы отопления с П-образными стояками аналогично системам с верхней разводкой. При отсутствии автоматической балансировки потери давления в стояках должны быть не менее 70 % от потерь давления в циркуляционных кольцах за исключением общих участков. В малоэтажных зданиях гидравлический режим системы является непредсказуемым. Балансировка диаметрами либо ручными балансировочными вентилями приводит к низкой гидравлической и тепловой устойчивости однотрубной системы отопления, в том числе, к транзитному сбросу в обратную магистраль теплоносителя завышенной температуры. При этом велико влияние погрешности гидравлического расчёта. Автоматические стабилизаторы расхода на стояках устраняют влияние погрешности гидравлического расчёта, но несколько повышают температуру сбрасываемого теплоносителя в обратную магистраль.

2. Комбинированные регуляторы расхода и температуры на стояках являются единственной возможностью обеспечения тепловой устойчивости системы за счёт устранения избыточного расхода в каждом стояке, а также, поддержания стабильной температуры обратного теплоносителя. При этом устраняется влияние погрешности гидравлического расчёта системы.

3. На сегодняшний день единственным способом балансировки системы, дающим существенную экономию энергии, являются комбинированные регуляторы расхода и температуры обратного теплоносителя. Экономия тепловой энергии за отопительный период составляет более 10 %.

Таблица 2

Результаты моделирования теплотребления системы отопления

Температура наружного воздуха t_{ext} , °C	Теплотребление системы отопления Q , Вт (числитель) / экономия энергии в процентах (знаменатель), в режиме:		
	расчётном (100 % нагрузка)	приготовление пищи в кухнях (70 % нагрузка)	освещение солнцем фасада (50 % нагрузка)
Способ 1. Балансировка диаметрами трубопроводов			
-22	139922 / 0	126404 / 0	104194 / 0
-10	92464 / 0	83480 / 0	68910 / 0
3,8	43173 / 0	39000 / 0	32357 / 0
Способ 2. Балансировка ручными балансировочными вентилями			
-22	139922 / 0	126319 / 0,1	104153 / 0
-10	92469 / 0	83446 / 0	68910 / 0
3,8	43179 / 0	40934 / -5,0	29856 / 7,7
Способ 3. Балансировка автоматическими стабилизаторами расхода			
-22	139922 / 0	126092 / 0,2	104109 / 0,1
-10	92532 / -0,1	83383 / 0,1	68936 / 0
3,8	43254 / -0,2	36539 / 6,3	29893 / 7,6
Способ 4. Балансировка комбинированными регуляторами расхода и температуры			
-22	129087 / 7,7	114494 / 9,4	90797 / 12,9
-10	83979 / 9,2	74439 / 10,8	60270 / 12,5
3,8	38198 / 11,5	31798 / 18,5	29620 / 8,5

Таблица 3

Годовое теплотребление системы отопления при различных способах балансировки

Способ балансировки системы	Годовое теплотребление, Q_{200} , кВт·ч / год	Экономия энергии в процентах
1. Диаметрами трубопроводов	266444	0
2. Ручными балансировочными вентилями	266655	-0,1
3. Автоматическими стабилизаторами расхода	266452	0
4. Комбинированными регуляторами расхода и температуры	238846	10,4

Примечание. Полученный результат является минимальным из достигаемого. Относится только к влиянию способа балансировки системы на энергоэффективность. Не учитывает воздействие способа балансировки на повышение эффективности терморегулирования помещений за счёт улучшения пропорциональности регулирования, возникающего только при применении автоматической балансировки, оцениваемой примерно в 10...15 % экономии энергии.

Таблица 4

Результаты моделирования системы отопления

Проблема системы отопления	Система без терморегуляторов	Система с автоматическими терморегуляторами и расходом теплоносителя				
		постоянным при балансировке			переменным. Балансировка комбинированными регуляторами расхода и температуры	
		диаметрами	ручной	автоматической стабилизации расхода	прямого действия	электронные
Использование теплопотуплений в помещения		*****	*****	*****	*****	*****
Вертикальная разрегулировка стояков	*	*	*	*	*	*****
Остаточная теплопередача отопительных приборов	****	*	*	*	***	***
Подвешивание радиаторов на подъёмной части стояков	****	*	*	*	***	***
Сброс горячего теплоносителя в обратную магистраль	***	*	*	*	*****	*****
Перетоки теплоносителя ¹	***	*	***	*****	*****	*****
Перегрев на срезке температурного графика	*	*****	*****	*****	*****	*****
Неустойчивая циркуляция в отдельных стояках малоэтажных зданий	*****	*	*****	*****	*****	*****
Итого		*	**	***	****	*****

¹ По причине изменения естественного давления, работы терморегуляторов, несанкционированного вмешательства и пр.
Примечание: пять звездочек – полное отсутствие проблемы в системе отопления.

Литература

- Милейковский В.А. Математическое моделирование переменного гидравлического режима однотрубных вертикальных систем водяного отопления // Данфосс INFO. – №3-4. – 2011. – С. 25-30.
- Милейковский В.А. Математическое моделирование переменного гидравлического и теплового режимов приборных узлов однотрубных вертикальных систем отопления // Данфосс INFO. – № 1-2, 2012. – С. 15-27.
- Милейковский В.А. Практические рекомендации по результатам математического моделирования переменного теплогидравлического режима однотрубных вертикальных систем отопления // Данфосс INFO. – № 1-2. – 2013. – С. 20-27.
- Милейковский В.А. Математическое моделирование остаточной теплопередачи отопительных приборов однотрубных вертикальных систем отопления // Данфосс INFO. – № 3-4. – 2013. – С. 20-23.
- Милейковский В.О. Исследования переменного тепло-гидравлического режима однотрубных вертикальных систем водяного отопления // Сборник докладов V международной научно-технической конференции. – М.: МГСУ, 2013. – С. 133-139.
- Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч. I. Отопление / В. Н. Богословский, Б. А. Крупнов, А. Н. Скани и др.; под ред. И. Г. Старовойра и Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.
- ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання/ Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К.: Укрархбудінформ, 2013. – 141 с.
- Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Є.Б. и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник. – изд. 3-е, перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1988.– 432 с.