

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 697.341

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С КЛАССИЧЕСКИМИ СХЕМАМИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ АБОНЕНТОВ

В.В. СМИРНОВ¹, Ю.В. ЯВОРОВСКИЙ², В.В. СЕННИКОВ¹, Д.О. РОМАНОВ²

¹ ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

² ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: kbispu@mail.ru, y1000@list.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Анализ применения термогидравлического распределителя в схемах централизованного теплоснабжения показал недостаточную изученность процесса взаимного влияния подключенных контуров, от которого зависит коэффициент гидравлической устойчивости тепловой сети. Кроме того, отсутствует сравнительный анализ эффективности теплоснабжения при использовании схемы с термогидравлическим распределителем и широко применяемой схемы присоединения абонентов. В связи с этим сравнение экономической и энергетической эффективности предлагаемой и существующих схем присоединения абонентов является актуальной задачей.

Материалы и методы. Исследования гидравлической взаимозависимости контуров термогидравлического распределителя проведены в лабораторных условиях в широком диапазоне. Обработка результатов осуществлена методом корреляционно-регрессионного анализа и математической статистики. При сравнительном анализе схем присоединения абонентов использованы методы физического моделирования теплогидравлических режимов.

Результаты. Проведен сравнительный анализ схем присоединения абонентов к тепловой сети, который показал, что энергетическая эффективность схемы с термогидравлическим распределителем выше в системах теплоснабжения с неавтоматизированными абонентами, независимо от температурного графика теплосети. При сравнении схем с параллельным присоединением подогревателя горячего водоснабжения выявлено, что совокупность затрат электроэнергии на циркуляцию теплоносителя и затрат топлива для схемы с термогидравлическим распределителем оказалась меньше независимо от температурного графика. С использованием статистических методов исследования подтверждена независимость контуров и нормальная подача теплоты на отопление. Получены новые решения задачи повышения гидравлической устойчивости системы централизованного теплоснабжения с применением термогидравлического распределителя в тепловом пункте – коэффициент гидравлической устойчивости теплосети при всех режимах работы абонента равен единице.

Выводы. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании тепловых пунктов: предлагаемой системы теплоснабжения, потребители которой обеспечат стабильный гидравлический режим; существующей системы теплоснабжения, потребители которой должны обеспечить гидравлически устойчивое регулирование теплоты.

Ключевые слова: эффективность системы теплоснабжения, гидравлически устойчивое регулирование, термогидравлический распределитель, гидравлический режим, тепловой пункт

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF THERMAL-HYDRAULIC DISTRIBUTOR WITH CLASSICAL SCHEMES OF CONNECTING SUBSCRIBERS

V.V. SMIRNOV¹, Yu.V. YAVOROVSKY², V.V. SENNIKOV¹, D.O. ROMANOV²

¹ Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russian Federation

² National Research University, Moscow, Russian Federation

E-mail: kbispu@mail.ru, y1000@list.ru

Abstract

Background. Analysis of the use of a thermo-hydraulic distributor in district heating schemes showed insufficient study of the mutual influence of the connected circuits, on which the coefficient of hydraulic stability of the heating network depends, and the lack of a comparative analysis of the efficiency of heat supply when using a scheme with a thermo-hydraulic distributor compared to widely used subscriber connection schemes. The purpose of the study is to compare the economic and energy efficiency of the proposed and existing subscriber connection schemes, which is an important task.

Materials and methods. In laboratory conditions, a wide range of studies have been carried out to study the hydraulic dependence of the contours of the thermo-hydraulic distributor among themselves. Processing of the results was carried out by the method of correlation-regression analysis and mathematical statistics. In a comparative analysis of subscriber connection schemes, methods of physical modeling of thermo-hydraulic modes were used.

Results. A comparative analysis showed that the energy efficiency of the scheme with a thermo-hydraulic distributor is higher in heating systems with non-automated subscribers, regardless of the temperature graph of the heating network. When comparing schemes with parallel connection of a hot water heater, it was found that the totality of electricity consumption for coolant circulation and fuel costs for a circuit with a thermo-hydraulic distributor turned out to be less irrespective of the temperature schedule. Statistical research methods confirmed the independence of the circuits and the normal supply of heat to the heating. New solutions have been obtained to increase the hydraulic stability of the centralized heat supply system using a thermo-hydraulic distributor at a heating point – the hydraulic stability coefficient of the heat network during all subscriber operation modes is equal to one.

Conclusions. The results of the study can be used in the design of thermal points: the proposed heating system, the consumers of which will provide a stable hydraulic mode; existing heat supply system, the consumers of which must ensure the hydro-stable control of heat.

Key words: efficiency of the heat supply system, hydraulically stable regulation, thermo-hydraulic distributor, hydraulic mode, heat point

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.005-013

Введение. Ранее опубликованные экспериментальные данные [1] подтвердили, что применение термогидравлического распределителя (ТГР) в качестве схемы присоединения абонентских теплопотребляющих систем позволяет локализовать переменные гидравлические режимы в пределах индивидуального теплового пункта (ИТП) и обеспечить нормальную подачу теплоты на систему отопления.

По разработанной программе [2] выполнено моделирование процесса теплоснабжения потребителя с ТГР в ИТП [3], результаты которого представлены на рис. 1. Анализ полученных зависимостей (рис. 1) показал, что независимо от изменения гидравлических режимов систем теплопотребления абонента как в течение

суток, так и в течение отопительного периода расход сетевой воды на абонентском вводе G_{ts} остается постоянным.

Анализ результатов моделирования и экспериментальных исследований ТГР [1] позволяет выдвинуть предположение о том, что модель расхода сетевой воды G_{ts} обладает одинаковой прогнозирующей способностью и в качестве расчетного значения можно использовать постоянную величину независимо от того, работает ли ТГР в режиме смешения или транзита.

Экспериментальные исследования образца ТГР [1] оказались возможны по большей части в условиях эксплуатации водяных тепловых сетей, когда расход воды во вторичных контурах потребителей G_{II} не превышает расхода воды в

первичном контуре теплосети $G_I = G_{ts}$. Таким образом, установка не позволила провести полноценные исследовательские испытания ТГР в смешительном режиме работы, когда $G_I < G_{II}$. Кроме того, трехпозиционный переключатель оборотов электродвигателя насосов во вторичных контурах ограничивал объем выборки для исследования гидравлического режима контура ГВС на тепловой режим контура отопления.

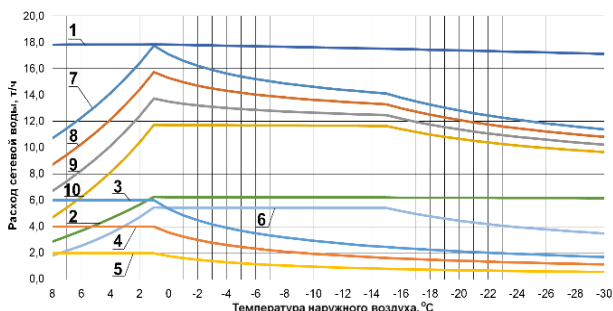


Рис. 1. Графики расходов сетевой воды G_{ts} , воды на отопление G_o , вентиляцию G_w , ГВС G_{gws} , суммарные (отопление, вентиляцию, ГВС) $G_{ow gws}$ с потребителем, подключенным к тепловой сети в АИТП через ТГР с трехходовым клапаном на линии отпления при различных k_c : 1 – G_{ts} ($k_c = 2,4; 1,6; 0$); 2 – G_o ($k_c = 2,4; 1,6; 1,8; 0$); 3 – G_{gws} ($k_c = 2,4$); 4 – G_{gws} ($k_c = 1,6$); 5 – G_{gws} ($k_c = 0,8$); 6 – G_w ($k_c = 2,4; 1,6; 1,8; 0$); 7 – $G_{ow gws}$ ($k_c = 2,4$); 8 – $G_{ow gws}$ ($k_c = 1,6$); 9 – $G_{ow gws}$ ($k_c = 0,8$); 10 – $G_{ow gws}$ ($k_c = 0$)

Методы исследования гидравлической зависимости контуров. Были проведены дополнительные экспериментальные исследования в лаборатории НИУ МЭИ, где установлен стенд с ТГР,

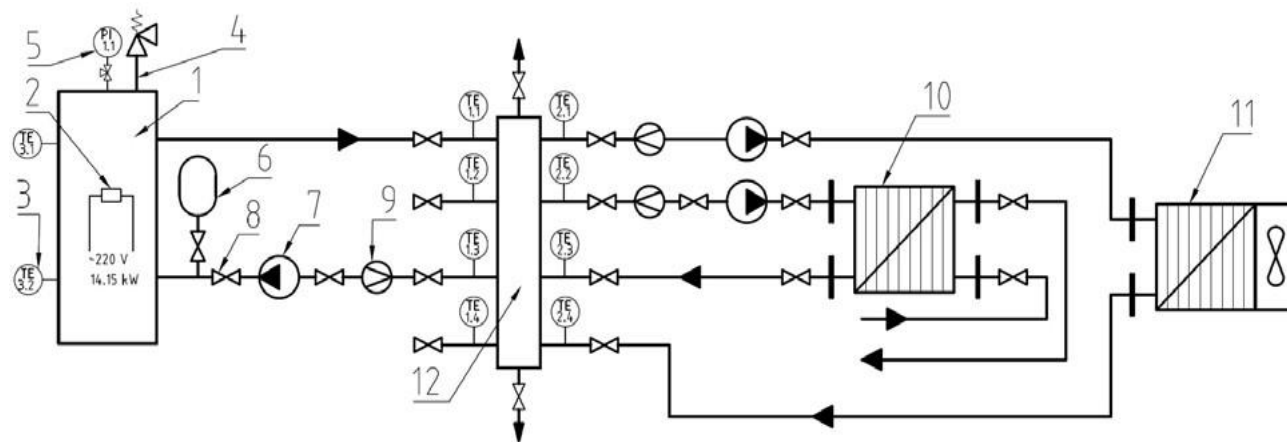


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – котел; 2 – электрические нагреватели; 3 – термометры сопротивления; 4 – предохранительный клапан; 5 – манометр; 6 – расширительный бак; 7 – насосы; 8 – запорные краны; 9 – электромагнитные расходомеры; 10 – водо-водяной теплообменник; 11 – калорифер; 12 – ТГР

принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

Исследуемый ТГР имеет 8 патрубков, которые позволяют подключить различное число источников и потребителей по различным функциональным конфигурациям. На рис. 2 показана конфигурация, в которой калорифер, моделирующий контур системы отопления, подключен к верхнему и нижнему патрубкам ТГР, а водоводяной подогреватель – к средним патрубкам. По показаниям электромагнитных расходомеров были установлены значения расходов в контуре источника (первичный) и в контурах потребителей (вторичные). Например, соотношение расходов 100 % – 115 % – 20 % показывает, что расход в первичном контуре 100 %, в контуре водоводяного теплообменника 115 % (смесительный режим работы), а в контуре с калорифером 20 %.

В первой серии испытаний по показаниям электромагнитных расходомеров зафиксированы расходы в контуре источника $G_I = G_{ts} = 0,52 \text{ м}^3/\text{ч}$ и контуре отопления $G_{so} = 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Температура воды на выходе из котла поддерживалась $t_{11} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$. Расход воды в контуре горячего водоснабжения (ГВС) G_{gws} варьировался в диапазоне от 40 до 175 %, при этом регистрировали показания расходов воды в первичном контуре G_I , контуре отопления G_{so} и температуры воды в подающей линии контура отопления t_{10} . Результаты измерений представлены в табл. 1 (опыты №№ 1–8), 2 и 3.

Во второй серии испытаний по показаниям электромагнитных расходомеров зафиксированы расходы в контуре источника $G_I = G_{ts} = 0,52 \text{ м}^3/\text{ч}$ и контуре ГВС

$G_{gws} = 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расход воды в контуре отопления G_{so} варьировался от 40 до 175 %, при этом снимали показания расходов воды в первичном контуре G_I и контуре ГВС G_{gws} .

Таблица 1. Результаты измерений расхода теплоносителя в первичном контуре от изменения расходов теплоносителя во вторичных контурах

Номер опыта, n	Отношение расходов, $G_{ts} - G_{gws} - G_{so}$	Суммарный расход воды во вторичных контурах, x_i	Результаты параллельных экспериментов, y_i		Среднее значение, \bar{y}_i
		$G_{II} = G_{so} + G_{gws}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$G_I = G_{ts}, \text{ м}^3/\text{ч}$		
1	100 % – 40 % – 20 %	0,307	0,520	0,518	0,5190
2	100 % – 55 % – 20 %	0,404	0,521	0,520	0,5205
3	100 % – 75 % – 20 %	0,488	0,520	0,521	0,5205
4	100 % – 95 % – 20 %	0,597	0,520	0,521	0,5205
5	100 % – 115% – 20 %	0,711	0,521	0,519	0,5200
6	100 % – 135 % – 20 %	0,802	0,521	0,519	0,5200
7	100 % – 150 % – 20 %	0,893	0,520	0,522	0,5210
8	100 % – 175 % – 20 %	1,006	0,521	0,520	0,5205
9	100 % – 20 % – 40 %	0,300	0,520	0,519	0,5195
10	100 % – 20 % – 55 %	0,392	0,521	0,522	0,5215
11	100 % – 20 % – 75 %	0,493	0,522	0,521	0,5215
12	100 % – 20 % – 95 %	0,591	0,521	0,519	0,5200
13	100 % – 20% – 115 %	0,692	0,521	0,519	0,5200
14	100 % – 20% – 135 %	0,799	0,520	0,519	0,5195
15	100 % – 20 % – 150 %	0,894	0,520	0,521	0,5205
16	100 % – 20 % – 175%	1,002	0,519	0,520	0,5195

Таблица 2. Результаты измерений расхода теплоносителя в контуре отопления от изменения расхода воды в контуре ГВС

Номер опыта, n	Отношение расходов, $G_{ts} - G_{gws} - G_{so}$	Расход воды в контуре ГВС, x_i	Результаты параллельных экспериментов, y_i		Среднее значение, \bar{y}_i
		$G_{gws}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$G_{so}, \text{ м}^3/\text{ч}$		
1	100 % – 40 % – 20 %	0,204	0,101	0,100	0,1005
2	100 % – 55 % – 20 %	0,303	0,099	0,098	0,0985
3	100 % – 75 % – 20 %	0,398	0,098	0,101	0,0995
4	100 % – 95 % – 20 %	0,500	0,096	0,100	0,0980
5	100 % – 115% – 20 %	0,608	0,097	0,099	0,0980
6	100 % – 135 % – 20 %	0,710	0,097	0,098	0,0975
7	100 % – 150 % – 20 %	0,798	0,097	0,102	0,0995
8	100 % – 175 % – 20 %	0,904	0,099	0,098	0,0985

Таблица 3. Результаты измерений температуры теплоносителя на входе в контур отопления от изменения расхода воды в контуре ГВС

Номер опыта, n	Отношение расходов, $G_{ts} - G_{gws} - G_{so}$	Расход воды в контуре ГВС, x_i	Результаты параллельных экспериментов, y_i		Среднее значение, \bar{y}_i
		$G_{gws}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$t_{10}, \text{ }^\circ\text{C}$		
1	100 % – 40 % – 20 %	0,204	69,8	70,0	69,90
2	100 % – 55 % – 20 %	0,303	70,0	69,8	69,90
3	100 % – 75 % – 20 %	0,398	70,1	70,0	70,05
4	100 % – 95 % – 20 %	0,500	70,0	70,1	70,05
5	100 % – 115% – 20 %	0,608	70,0	69,9	69,95
6	100 % – 135 % – 20 %	0,710	69,8	70,1	69,95
7	100 % – 150 % – 20 %	0,798	70,0	69,8	69,90
8	100 % – 175 % – 20 %	0,904	70,1	70,0	70,05

Результаты исследования гидравлической зависимости контуров. Результаты измерений расхода теплоносителя в первичном контуре представлены в табл. 1 (опыты №№ 9–16).

Статистические связи выборочных значений исследованы методами корреляционно-регрессионного анализа и математической статистики, в частности методами проверки статистических гипотез [4, 5].

Эмпирические распределения выборочных величин G_I , G_{so} , t_{10} подчиняются закону нормального распределения с соответствующими математическими ожиданиями $\mu \approx \bar{y}$ и стандартными отклонениями $\sigma \approx S_y$. В качестве критерия согласия для выборок объемом $n \geq 12$ принимался критерий согласия Пирсона χ^2 («хи-квадрат») как наиболее мощный [6]. Для меньшего объема выборок использовался критерий Крэмера-Мизеса-Смирнова ω^2 («омега-квадрат»). С учетом этого можно вычислять вероятности любых событий, используя хорошо изученные свойства этого распределения.

В результате исследования установлено, что линейная аппроксимация $\hat{y} = b_0 + b_1 x$ адекватно описывает данные выборок экспериментов $G_{ts} = f(G_{II})$, $G_{so} = f(G_{gws})$, $t_{10} = f(G_{gws})$ и обладает одинаковой прогнозирующей способностью со средним значением. Адекватность и целесообразность использования модели проверялись с помощью критерия Фишера с надежностью $P = 0,95$. Средняя ошибка аппроксимации составила не более 1,0 %.

Выполнена проверка значимости коэффициентов регрессии b_0 и b_1 , а также анализ корреляции выборочных данных с помощью критерия Стьюдента на уровне значимости $\alpha = 0,1$. При оценке параметра регрессии b_1 выборочные данные охарактеризовали гипотезу о независимости выборочных значений как весьма возможную и правдоподобную: генеральный коэффициент при независимой переменной $\beta_1 = 0$. При оценке параметра регрессии b_0 с учетом степеней свободы подтверждено, что нет существенного различия между оценкой параметра регрессии b_0 , полученного по результатам выборки n , и истинным значением параметра β_0 , полученного по результатам математического моделиро-

вания: $G_{ts} = f(G_{II})$: $b_0 = \beta_0 = G_{ts}$; $G_{so} = f(G_{gws})$: $b_0 = \beta_0 = G_{so}$; $t_{21} = f(G_{gws})$: $b_0 = \beta_0 = t_{21}$. Корреляционный анализ выборочных данных показал, что различие между выборочным коэффициентом корреляции r_{xy} и генеральным $\rho = 0$ незначимо.

Методы исследования энергетической и экономической эффективности схемы с ТГР. Годовой расход электроэнергии на перекачку теплоносителя, кВт·ч/год, определяется по формуле

$$\Theta = \frac{G_I \cdot \Delta H_{CH} \cdot Z_I}{3,6 \cdot 10^2 \cdot \eta}, \quad (1)$$

где Z_I – число часов работы системы в году при расходах G_I , т/ч, и располагаемом напоре сетевого насоса ΔH_{CH} , м вод. ст.; η – КПД насосной установки.

Располагаемый напор, развиваемый сетевым насосом, можно считать состоящим из трех слагаемых потерь давления: на теплоисточнике $\Delta H_{ист}$; в сети ΔH_c ; абонентском вводе $\Delta H_{аб}$.

В двухтрубных закрытых системах теплоснабжения расход сетевой воды имеет переменный характер как в течение отопительного периода, так и в течение суток в зависимости от графика потребления ГВС. Расход сетевой воды, а также воды, поступающей на систему отопления, определяется регулятором температуры (РТ) на ГВС и зависит от коэффициента гидравлической устойчивости сети, определяемого по формуле

$$Y = \frac{G_p}{G^{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta H_{аб}}{\Delta H_{аб} + \Delta H_c}}, \quad (2)$$

где G_p , G^{\max} – расчетный и максимально возможный расход сетевой воды на абонентский ввод потребителя, т/ч.

Наибольший расход воды будет иметь место при полностью открытом РТ в присоединенной сети. Такой режим является расчетным для выбора сетевого насоса [7].

Отопительный температурный график тепловой сети с абонентами без РР может не обеспечить суточный баланс теплоты на систему отопления. Для устранения этой проблемы необходимо повышать гидравлическую устойчивость системы, что может быть решено увеличением гидравлических потерь на абонентском вводе [8, 9]. Это, в свою очередь, приводит

к увеличению затрат электроэнергии на перекачку теплоносителя.

Стабилизация расхода воды на систему отопления, что может быть достигнуто установкой регулятора расхода (РР) в ИТП, обеспечивает нормальное регулирование подачи теплоты на систему отопления, но до тех пор, пока $\Delta H_{аб} > \Delta H_{аб}^{min PP}$, $\Delta H_{аб}^{min PP}$ – минимальный располагаемый напор на абонентском вводе, при котором РР полностью открыт. Таким образом, РР требует $\Delta H_{аб}$, достаточного для его функционирования.

Коэффициент гидравлической устойчивости абонентов γ , оснащенных РР, приблизительно равен единице при всех режимах работы.

ТГР представляет собой перемычку с низким гидравлическим сопротивлением. При моделировании процесса теплоснабжения потребителя с ТГР в ИТП (см. рис. 1) напор в узле присоединения потребителя составил $\Delta H_{аб} = 0,14$ м вод. ст., при этом сетевой расход $G_{ис} = const$ соответствует максимальному расходу теплоносителя в точке излома температурного графика.

Классическая схема присоединения абонентов с ГВС имеет переменный расход сетевой воды, но требует достаточно

высокого располагаемого напора у абонента. Схема с ТГР требует максимально расчетного расхода, но практически незначительного располагаемого напора у абонента.

В качестве примера выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей схем подключения абонентов теплоснабжения, а также режимов работы параллельной, двухступенчатой смешанной без ТГР и параллельной с ТГР схем присоединения нагрузки ГВС при одинаковом сопротивлении сети S_c и следующих условиях: температурный график в сети – отопительный для климатических условий г. Иваново; расчетная нагрузка на отопление – $Q_0 = 0,5$ Гкал/ч; относительная максимальная нагрузка ГВС – $\rho_{max} = Q_{ГВС}^{max} / Q_0 = 0,48$, $\rho_{cp} = Q_{ГВС}^{cp} / Q_0 = 0,2$; суточный график нагрузки ГВС – $Q_{ГВС} = 0$ продолжительностью 6 ч; $Q_{ГВС} = 0,8Q_{ГВС}^{cp} - 10$ ч; $Q_{ГВС} = 1,6Q_{ГВС}^{cp} - 4$ ч; $Q_{ГВС} = 2,4Q_{ГВС}^{cp} - 4$ ч; тариф на электроэнергию – 4,72 руб/кВт·ч, на газ – 5720 руб. за 1000 нм³.

Результаты исследования энергетической и экономической эффективности схемы с ТГР. Результаты расчета представлены в табл. 4, 5.

Таблица 4. Техничко-экономические показатели теплоснабжения за отопительный период (температурный график 150/70 °С, $S_c = 0, 128 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}^2/\text{т}^2$, $t_{ни} = 1,0$ °С)

Обозначение	Параллельная схема				Смешанная схема с элеватором и РР
	с элеватором и РР	с насосом смещения и РР	с элеватором без РР	с ТГР	
γ	1,0	1,0	0,976	1,0	1,0
$t_b, \text{ }^\circ\text{C}$	18,0	18,0	17,83	18,0	18,0
$\Delta H_{аб}^{min}$, м вод. ст.	14,78*	2,78	86,20	0,067	20,4**
$\Delta H_{сн}$, м вод. ст.	35,0	23,0	105,0	19,47	35,0
Э, кВт·ч	6609,332	4343,276	19533,309	5945,446	5942,149
$Q_{сум}$, ГДж	6887,364	6887,364	6855,063	6714,729	5570,622
\bar{E} , кВт·ч/ГДж	0,960	0,697	2,850	0,885	1,067
V , тыс. нм ³	204,340	204,340	203,382	199,218	165,273
$FC_э$, тыс. руб.	31,196	22,662	92,197	28,063	28,047
$VC_т$, тыс. руб.	1168,824	1168,824	1163,342	1139,527	945,366
TC , тыс. руб.	1200,020	1191,486	1255,54	1167,590	973,413

*Располагаемый напор, достаточный для функционирования элеватора.

**Располагаемый напор, достаточный для функционирования элеватора и преодоления сопротивления подогревателя ГВС первой ступени.

Таблица 5. Техничко-экономические показатели теплоснабжения за отопительный период (температурный график 95/70 °С, $S_c = 0,025 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}^2/\text{т}^2$, $t_{\text{ни}} = 11,9 \text{ °С}$)

Обозначение	Параллельная схема			Смешанная схема с РР
	с РР	без РР	с ТГР	
γ	1,0	0,913	1,0	1,0
$t_{\text{в}}, \text{°С}$	18,0	17,93	18,0	18,0
$\Delta H_{\text{аб}}^{\text{мин}}$, м вод. ст.	4,68	44,22	0,3	9,98
$\Delta H_{\text{сн}}$, м вод. ст.	22,0	60,0	17,25	20,0
\mathcal{E} , кВт·ч	11369,897	30362,436	10789,667	9573,406
$Q_{\text{сум}}$, ГДж	7990,102	7975,433	6714,729	6132,460
$\bar{\mathcal{E}}$, кВт·ч/ГДж	1,423	3,807	1,606	1,561
V , тыс.нм ³	237,057	236,621	199,218	181,943
FC_3 , тыс. руб.	53,666	143,311	50,899	45,168
$VC_{\text{т}}$, тыс. руб.	1355,965	1353,476	1139,527	1040,713
TC , тыс. руб.	1409,631	1496,787	1190,426	1085,900

Примечание. При определении годового расхода электроэнергии на перекачку теплоносителя потери давления в системе теплоприготовления теплоисточника $\Delta H_{\text{ист}}$ как постоянные в расчетах не учтены; КПД насосной установки принят $\eta = 0,6$. При расчете \mathcal{E} для схемы с ТГР учтен расход воды во вторичных контурах ТГР. Гидравлическое сопротивление системы отопления и теплообменника ГВС принято $S_{\text{со}} = 0,002496 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}^2/\text{т}^2$ и $S_{\text{то гвс}} = 0,138598 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}^2/\text{т}^2$ соответственно.

$t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха, соответствующая наружной температуре точки излома $t_{\text{ни}}$, °С; $\Delta H_{\text{аб}}^{\text{мин}}$ – располагаемый напор у абонента при $Q_{\text{гвс}}^{\text{max}}$, м вод. ст.; \mathcal{E} – расход электроэнергии на перекачку теплоносителя за отопительный период, кВт·ч; $Q_{\text{сум}}$ – количество теплоты, отданное потребителю теплоисточником, ГДж; $\bar{\mathcal{E}}$ – удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/ГДж; V – расход газа за отопительный период, тыс. м³; FC_3 – эксплуатационные затраты на перекачку теплоносителя, тыс. руб.; $VC_{\text{т}}$ – затраты на топливо (газ), тыс. руб.; TC – общие затраты производства теплоты (на электроэнергию и топливо), тыс. руб.

Сравнительный анализ технико-экономических показателей параллельных схем присоединения подогревателей ГВС показывает, что схема с ТГР по общим затратам экономичнее для обоих температурных графиков, хотя по затратам на электроэнергию уступает схеме с насосом смешения за счет меньшего дросселирования напора у последней. Элеваторная схема с РР требует поддержания высокого значения $\Delta H_{\text{аб}}^{\text{мин } \mathcal{E}}$ для обеспечения его функционирования. Для элеваторной схемы без РР высокий напор объясняется увеличением гидравлической устойчивости, достаточной для обеспечения суточного баланса теплоты потребителя. Для неавтоматизированных систем теплоснабжения повышение гидравлической устойчивости – основное средство повышения стабильности их ра-

боты. Необходимо отметить, что для температурного графика 150/70 °С и при сопротивлении системы $h_{\text{со}} = 1,0$ м вод. ст.

$\Delta H_{\text{аб}}^{\text{мин } \mathcal{E}} = 14,336$ м вод. ст. При $h_{\text{со}} = 2,0$ м вод. ст. $\Delta H_{\text{аб}}^{\text{мин } \mathcal{E}} = 28,672$ м вод. ст., что приведет к еще большим затратам на перекачку теплоносителя. Также стоит отметить, что ТГР устраняет «перетоп» практически в середине температурного графика 95/70 °С.

Для обоих температурных графиков по общим затратам параллельная схема с ТГР уступает двухступенчатой смешанной за счет большего производства теплоты на ГВС теплоисточником. Для температурного графика 95/70 °С по затратам на перекачку теплоносителя обе схемы практически идентичны.

РР обеспечивает нормальную подачу теплоты на систему отопления, но не

устраняет «перетоп» и гидравлическую разбалансированность, вызванную функционированием РТ.

Выводы. Статистические связи выборочных значений G_{ts} , G_{so} , t_{10} при эксплуатации ТГР в режимах разделения и смешения потоков подтвердили независимость расходов воды между контурами $G_{ts} \neq f(G_{II})$, $G_{so} \neq f(G_{gws})$ и обеспечение нормальной подачи теплоты на систему отопления $t_{10} \neq f(G_{gws})$ (при условии $G_{so} < G_{ts}$).

ТГР в качестве схемы присоединения абонентских теплопотребляющих систем обеспечивает гидравлически устойчивое регулирование теплоты. Коэффициент гидравлической устойчивости абонента при всех режимах его работы $Y = 1$.

Суть гидравлически устойчивого регулирования заключается в том, что на вводе в ИТП поддерживается в течение всего отопительного периода расчетный максимальный расход теплоносителя G_{ts} . При температурах наружного воздуха, отличных от точки «излома», когда потребителю требуется меньший сетевой расход воды, невостребованное количество теплоносителя будет проходить транзитом через ТГР из подающего трубопровода в обратный, тем самым обеспечивая гидравлическую устойчивость сети, близкую к единице. За счет этого созданы условия, при которых технологические интересы источника теплоты и транспортирующих теплосетей не входят в противоречие с желанием потребителя использовать столько теплоты, сколько ему необходимо, и тогда, когда это требуется.

Выбор схемы присоединения с ТГР должен сопровождаться соответствующим технико-экономическим обоснованием.

Анализ сопоставления схем с параллельным присоединением подогревателя ГВС к теплосети подтверждает экономическую целесообразность схемы с ТГР в системах теплоснабжения независимо от температурного графика. Для пониженных температурных графиков ТГР эффективно выполняет функцию устранения «перетопа» с гидравлически устойчивым регулированием.

Энергетическая эффективность схемы ИТП с ТГР повышается в системах теплоснабжения с потребителями с неиз-

менным гидравлическим сопротивлением отопительных систем (без РР) независимо от температурного графика системы теплоснабжения.

Список литературы

1. Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Сенников В.В. Экспериментальное подтверждение локализации переменных гидравлических режимов в тепловых пунктах с термогидравлическим распределителем // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 5–14.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613171. Теплогидравлический расчет тепловой сети с ТГР / В.В. Смирнов, Ю.В. Яворовский, Д.Р. Залаев; заявитель и патентообладатель ИГЭУ; № 2019612032; заявл. 01.03.2019; опубл. 12.03.2019.
3. Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Сенников В.В. Устройство для повышения эффективности работы централизованной системы // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 17–25.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
5. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя. – СПб.: Питер, 2008. – 608 с.
6. Лемешко Б.Ю., Лемешко, С.Б. Постовалов С.Н. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – № 2(34). – С. 96–111.
7. Байбаков С.А., Субботина Е.А., Филатов В.М. Частотно-регулируемый привод. Регулирование центробежных насосов и методы регулирования отпуска тепла в тепловых сетях (окончание) // Новости теплоснабжения. – 2014. – № 1(161). – С. 32–40.
8. Гидравлическая устойчивость тепловой сети / Д.А. Абдулаев, Е.А. Маркелова, А.Р. Сабирзянов, Н.Ю. Миронов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1(52). – С. 67–85.
9. Чупрынин В.А., Иванов А.Г. Гидравлическая устойчивость работы водяных тепловых сетей и способы ее повышения // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 8. – С. 31–32.

References

1. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V. Sennikov, V.V. Eksperimental'noe podtverzhdenie lokalizatsii peremennykh gidravlicheskiykh rezhimov v teplovykh punktakh s termogidravlicheskim raspredelitelem [Experimental confirmation of the localization of variable hydraulic regimes in

heat points with a thermo-hydraulic distributor]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 5–14.

2. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Zalaev, D.R. *Teplogidravlicheskiy raschet teplovo-y seti s TGR* [Thermohydraulic calculation of the heat network with TGR]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019613171 [Certificate of state registration of computer program № 2019613171], 2019.

3. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Sennikov, V.V. *Ustroystvo dlya povysheniya effektivnosti raboty tsentralizovannoy sistemy* [A device for improving the efficiency of a centralized system]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 17–25.

4. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003. 479 p.

5. Vadzinskiy, R. *Statisticheskie vychesleniya v srede Excel. Biblioteka pol'zovatelya* [Statistical calculations in Excel. User Library]. Saint-Petersburg: Piter, 2008. 608 p.

6. Lemeshko, B.Yu., Lemeshko, S.B., Postovalov, S.N. *Sravnitel'nyy analiz moshchnosti kriteriev soglasiya pri blizkikh konkuriruyushchikh*

gipotezakh. I. Proverka prostykh gipotez [Comparative analysis of the power of the compliance criteria with close competing hypotheses. I. Testing simple hypotheses]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*, 2008, no. 2(34), pp. 96–111.

7. Baybakov, S.A., Subbotina, E.A., Filatov, V.M. *Chastotno-reguliruemyy privod. Regulirovaniye tsentrobezhnykh nasosov i metody regulirovaniya otpuska tepla v teplovykh setyakh (okonchanie)* [Variable frequency drive. Regulation of centrifugal pumps and methods of regulation of heat supply in heat networks (end)]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2014, no. 1(161), pp. 32–40.

8. Abdulaev, D.A., Markelova, E.A., Sabirzyanov, A.R., Mironov, N.Yu. *Gidravlicheskaya ustoychivost' teplovo-y seti* [Hydraulic stability of the heat network]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2017, no. 1(52), pp. 67–85.

9. Chuprynin, V.A., Ivanov, A.G. *Gidravlicheskaya ustoychivost' raboty vodyanykh teplovykh setey i sposoby ee povysheniya* [Hydraulic stability of the operation of water heating networks and ways to increase it]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2003, no. 8, pp. 31–32.

Смирнов Владимир Владимирович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. Б, ауд. 507, телефон (4932) 26-98-86, e-mail: kbispu@mail.ru

Smirnov Vladimir Vladimirovich,

Ivanovo State Power Engineering University, senior lecturer of the Department of Industrial Heat Power Engineering, address: Ivanovo, st. Rabfakovskaya St., 34, Building B, Room 507, telephone (4932) 26-98-86, e-mail: kbispu@mail.ru

Яворовский Юрий Викторович,

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», кандидат технических наук, зав. кафедрой промышленных теплоэнергетических систем, адрес: г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, телефон (495) 362-75-53, e-mail: y1000@list.ru

Yavorovsky Yuri Viktorovich,

National Research University (Moscow Power Engineering Institute), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Industrial Heat and Power Systems Department, address: Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, telephone (495) 362-75-53, e-mail: y1000@list.ru

Сенников Владимир Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. Б, ауд. 506, телефон (4932) 26-98-86, e-mail: kbispu@mail.ru

Sennikov Vladimir Vasilievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Industrial Thermal Power Engineering Department, address: Ivanovo, Rabfakovskaya St, 34, Building Б (B), room 506, telephone (4932) 26-98-86, e-mail: kbispu@mail.ru

Романов Дмитрий Олегович,

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», аспирант кафедры промышленных теплоэнергетических систем, адрес: г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, телефон (495) 362-75-53, e-mail: y1000@list.ru

Romanov Dmitriy Olegovich,

National Research University (Moscow Power Engineering Institute), graduate student of the Department of Industrial Heat and Power Systems, address: Moscow, Krasnokazarmennaya St., house 14, telephone (495) 362-75-53, e-mail: y1000@list.ru