

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 697.34

Экспериментальное подтверждение локализации переменных гидравлических режимов в тепловых пунктах с термогидравлическим распределителем¹

В.В. Смирнов¹, Ю.В. Яворовский², В.В. Сенников¹

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: yavorovskyYV@mpei.ru, kbispu@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Установка у отдельных потребителей регуляторов теплового потока приводит к появлению дополнительных затрат, связанных с обеспечением переменных теплогидравлических режимов и не снижает отпуска теплоты на источнике. Полная автоматизация тепловых пунктов приводит к нарушению качественного режима регулирования теплосети. Проблема эта актуальна и имеет важное практическое значение. Автоматизация абонентских вводов может реально экономить топливо, если будут реализованы схемы гидравлически устойчивого регулирования, основная суть которых заключается в том, чтобы активное регулирование теплового потока в тепловом пункте не приводило к изменению расхода воды в теплосети. В связи с этим необходимо экспериментальное подтверждение возможности локализации переменных гидравлических режимов в тепловых пунктах при применении термогидравлического распределителя.

Материалы и методы. Для экспериментального подтверждения результатов теоретических исследований проведена реконструкция теплового пункта централизованной системы теплоснабжения путем установки термогидравлического распределителя. Программа эксперимента заключается в доказательстве гидравлической независимости контуров систем потребителей на внешнюю тепловую сеть.

Результаты. Впервые получены экспериментальные данные, которые подтверждают, что термогидравлический распределитель не приводит к нарушению качественного режима регулирования теплосети, локализуя переменные гидравлические режимы в пределах теплового пункта, где они и возникают, не передавая эти режимы в тепловую сеть. В отличие от известных способов регулирования, использование в схеме теплового пункта термогидравлического распределителя обеспечивает нормальную подачу теплоты в систему отопления при неизменном максимальном расходе сетевой воды в течение всего отопительного периода. Достоверность результатов, полученных ранее с использованием математического моделирования, подтверждена экспериментальными данными.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований подтвердили гидравлическую независимость контуров. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и реконструкции существующих тепловых пунктов систем централизованного теплоснабжения для исключения влияния функционирования средств регулирования теплоты на гидравлический режим системы теплоснабжения.

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

Experimental confirmation of the localization of variable hydraulic regimes in thermal points with a thermo-hydraulic distributor

V.V. Smirnov¹, Yu.V. Yavorovsky², V.V. Sennikov¹

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² National Research University, Moscow (MPEU), Russian Federation

E-mail: yavorovskyYV@mpei.ru, kbispu@mail.ru

¹ Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 16.516.11.6089 Шифр «2011-1.6-516-037-030».

Abstract

Background. Installation of heat flow regulators on individual consumers' premises leads to additional costs associated with providing variable thermal-hydraulic regimes and does not reduce the heat supply at the source. Full automation of heat points reduces the quality of the heating network regulation. This problem is of current practical importance. Automation of consumer connections can actually save fuel if hydraulically stable control schemes are implemented, in which active regulation of the heat flow at the heating station does not change the water flow in the heating network. All this makes it necessary to experimentally confirm the possibility to localize variable hydraulic regimes in heat points by using a thermo-hydraulic distributor.

Materials and methods. For experimental confirmation of the results of theoretical studies, we have redesigned the thermal point of the centralized heat supply system by installing a thermo-hydraulic distributor. The experiment consists in confirming the hydraulic independence of the circuits of the consumer systems to the external heating network.

Results. For the first time, it has been experimentally confirmed that installing a thermo-hydraulic distributor does not lead to a violation of the quality regulation regime of the heating network, localizing the variable hydraulic regimes within the thermal point, where they arise, without transferring these regimes to the heating network. In contrast to the other known regulation methods, using a thermo-hydraulic distributor in the heat point circuit ensures normal heat supply to the heating system maintaining a constant maximum flow rate of the supply water during the entire heating period. The reliability of the results obtained earlier by mathematical modeling has been confirmed by experimental data.

Conclusions. The results of the experimental studies have confirmed the hydraulic independence of the circuits. The obtained results can be used for designing new and redesigning the existing heating substations of centralized heat supply systems in order to eliminate the effects of temperature regulation on the hydraulic regime of the heat supply system.

Key words: hydraulically stable regulation, thermo-hydraulic distributor, heat point, hydraulic regime

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.005-014

Введение. Появление нагрузки горячего водоснабжения (ГВС) привело к ограничению нижнего предела температуры сетевой воды в подающем трубопроводе теплосети. Так называемый «излом» температурного графика при отсутствии местного регулирования отпуска тепла приводит к перерасходу теплоты на системы отопления абонентов, ухудшению санитарно-гигиенических условий в отапливаемых помещениях, а следовательно, и перерасходу топлива на источнике теплоты, т. е. возникают так называемые «перетопы». Следует отметить, что для источника, находящегося в средней полосе России и отпускающего тепло по пониженному температурному графику (95/70 °С), «излом» последнего происходит практически в середине отопительного графика. Перерасход теплоты за период поддержания температуры воды в теплопроводе на неизменном значении достигает 5–13 % годового расхода тепла [1]. Эффективное и рациональное использование энергетических ресурсов в сфере теплоснабжения носит актуальный характер, о чем свидетельствует закон № 261-ФЗ об энергосбережении.

Регулирование расхода сетевой воды в период «излома» температурного графика позволяет устранить перерасход тепла на отопление, а следовательно, и повысить энергоэффективность тепловых сетей. В широко распространенной схеме подключения отопительных установок с элеваторным присоединением уменьшение расхода сетевой воды приводит к уменьшению расхода воды в местной системе отопления (после элеватора), что может вызвать полное отсутствие циркуляции в ней. Поэтому в отечественных системах теплоснабжения индивидуальное и местное регу-

лирование тепловой нагрузки отопления не применяется в необходимых для этого масштабах.

В практике проектирования и эксплуатации абонентских вводов централизованных систем теплоснабжения как в нашей стране, так и за рубежом используется система регулирования теплового потока, которую можно назвать гидравлически неустойчивой. Суть системы состоит в количественном регулировании расхода сетевой воды, при котором регулирующий орган, установленный на подающей линии теплосети в индивидуальном тепловом пункте (ИТП), перекрывает поток воды, движущийся от теплоисточника, на регулируемом абонентском вводе [1, 2, 3, 4]. Изменение расхода сетевой воды у отдельных абонентов из-за низкой гидравлической устойчивости тепловой сети вызывает переменные гидравлические режимы во всей сети. На эффективность работы системы централизованного теплоснабжения влияют переменные режимы работы теплосетей и теплоиспользующего оборудования, поэтому задача оптимизации теплогидравлических режимов является актуальной и носит важное практическое значение.

Основной принцип общепринятой системы регулирования заключается в том, что при срабатывании регулирующего органа на одном ИТП автоматические устройства всех остальных абонентских вводов объектов, присоединенных к единой теплосети, должны отреагировать таким образом, чтобы сохранить на неизменном уровне располагаемый напор перед потребителем. Предполагается, что у всех потребителей, подключенных к общей тепловой сети, установлены регуляторы перепада давления на вводе и эти регуляторы всегда

исправно работают. Общепринятый метод регулирования эффективно работает в Европе, где ИТП потребителей, подключенных к системе централизованного теплоснабжения, изначально оборудовались необходимой автоматикой, постоянно поддерживающей в рабочем состоянии. Например, за рубежом, особенно в Дании и странах Скандинавии, изначально полная автоматизация всех абонентов теплоты позволила отказаться от централизованного качественного метода регулирования тепла и понизить расчетные значения температуры в подающем трубопроводе до 110–120 °С [5]. Отечественные системы теплоснабжения, в начале развития теплофикации вынужденные выполнять регулирование отпуска теплоты от теплоисточника по методу центрального качественного регулирования, изначально были лишены какой-либо автоматики.

Применение автоматического регулирования отпуска тепла в тепловых пунктах потребителей является одним из эффективных путей энергосбережения и повышения комфортности в отапливаемых помещениях. В последнее время в ходе развернувшейся борьбы за энергосбережение во многих тепловых пунктах стали устанавливаться средства автоматического регулирования отпуска теплоты для систем отопления и ГВС. Установка на отдельных объектах регуляторов теплового потока не только не экономит топливо, но и влечет к появлению дополнительных затрат, связанных с обеспечением переменных теплогидравлических режимов. Автоматизация отдельных систем отопления может решить локальную задачу энергосбережения на этом объекте, но из-за малой гидравлической устойчивости протяженных сетей практически не даст снижения отпуска теплоты на источнике [6]. При выборочной автоматизации будет происходить перераспределение сетевой воды между автоматизированными абонентами, у которых расход воды будет сокращаться, и неавтоматизированными, у которых при увеличении располагаемых напоров в сети расходы сетевой воды увеличатся, в результате чего общий расход сетевой воды на источнике теплоснабжения не уменьшится [7] и сэкономленная часть тепла у одних потребителей (автоматизированных) будет использована в качестве перерасхода у других абонентов (неавтоматизированных) и общее потребление тепла и расход топлива на теплоисточнике останутся неизменными.

Достичь энергосберегающего эффекта возможно, организовав стопроцентную автоматизацию отпуска тепла в ИТП всех потребителей теплоты, что приведет к отказу от качественного регулирования отпуска тепла в пользу качественно-количественного и количественного [8].

Автоматизация абонентских вводов тепловой сети может реально экономить топливо, если будут реализованы схемы гидравлически устойчивого регулирования, основная суть которых заключается в том, чтобы активное регулирование теплового потока в ИТП не приводило к изменению сетевого расхода в тепловой сети, а следовательно, и к изменению гидравлического режима в теплосети в целом.

В [7, 9, 10] предложены схемы гидравлически устойчивого регулирования теплового потока на отопление. Недостатком схем является то, что невозможно обеспечить гидравлическую устойчивость в тепловой сети с потребителями, системы отопления которых подключены через элеватор, из-за сложности поддержания гидравлического режима в отопительной системе.

Свод правил (СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов. Минстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1996. – 78 с.) предусматривает выбор присоединения подогревателей ГВС в закрытых схемах теплоснабжения в зависимости от соотношения максимального потока теплоты на ГВС и максимального потока теплоты на отопление. Этот же свод правил регламентирует, что при теплоснабжении от котельных мощностью менее 35 МВт включительно при технико-экономическом обосновании допускается присоединение к тепловым сетям подогревателей систем ГВС по одноступенчатой схеме независимо от соотношения тепловых нагрузок систем ГВС и отопления. При этом для этих схем предусматривается стабилизация расхода сетевой воды на отопление, осуществляемая установкой на абонентском вводе регулятора перепада давлений.

Но регулятор перепада давления может быть не установлен, при этом устанавливается только РТ на ГВС – абонентские теплопотребляющие установки с неизменным гидравлическим сопротивлением отопительных систем. Расход воды, поступающий в систему отопления по такой схеме, зависит от располагаемого напора в сети, который, в свою очередь, определяется расходом воды на ГВС. Т. е. в этих условиях отопительный температурный график может не обеспечить требуемую зависимость расхода теплоты на отопление от наружной температуры.

Поэтому для абонентских теплопотребляющих установок с неизменным гидравлическим сопротивлением систем отопления несоблюдение выбора схемы присоединения подогревателей ГВС в закрытых системах теплоснабжения согласно СП 41-101 (выбор одноступенчатой схемы вместо двухступенчатой и отсутствие стабилизации расхода воды на отопление) повлечет увеличение гидравлической устойчивости тепловой сети Y , что может быть решено увеличением располагаемого

напора на абонентском вводе, а следовательно, и на источнике тепла. В свою очередь, несоблюдение последнего приведет к нарушению теплового режима здания, либо к необходимости корректировать температурный график. Регулирование отпуска тепла в этом случае осуществляется только централизованно – по принципу связанной подачи тепла в системы отопления. Следует отметить, что в этом случае корректируемая температура воды в подающей линии тепловой сети зависит от гидравлической устойчивости сети Y и относительного расхода сетевой воды на ГВС n [11], который у различных абонентов имеет различные значения. Чем выше Y и меньше n , тем ниже эта температура.

В [11] рассмотрены вопросы, касающиеся применения в ИТП в качестве схемы присоединения абонентских установок термогидравлического распределителя (ТГР) как устройства, позволяющего исключить «перетоп» потребителей и влияние неравномерности потребления ГВС в течение суток и дней недели на тепловой режим здания для абонентов с неизменным гидравлическим сопротивлением отопительных установок; представлена математическая модель работы ТГР с трехходовым клапаном на линии отопления.

Методы исследования. Для источников теплоснабжения, использующих способ центрального качественного регулирования отпуска тела при количественном регулировании теплоты на отопительные системы в ИТП, обеспечить высокую гидравлическую устойчивость системы теплоснабжения при малом располагаемом напоре на абонентском вводе возможно при условии использования в качестве схемы присоединения абонентских установок в ИТП ТГР.

Теоретические исследования тепловых и гидравлических режимов, происходящих в ТГР как устройстве по устранению тепловой и гидравлической разбалансированности систем теплоснабжения, способствовали разработке экспериментального образца ТГР.

В существующем ИТП «Гараж» ИГЭУ был изготовлен и смонтирован экспериментальный образец ТГР вертикального типа в целях улучшения процесса распределения тепловой энергии потребителям с разнородной тепловой нагрузкой. ИТП «Гараж» снабжается теплом от существующей водогрейной котельной ИГЭУ, работающей по отопительному температурному графику 95/70 °С с изломом на 65 °С. Система теплоснабжения: двухтрубная зависимая с непосредственным присоединением систем отопления и закрытой одноступенчатой параллельной схемой подключения ГВС с установкой разборных пластинчатых теплообменников типа М фирмы «Альфа Лаваль Поток», г. Королев Московской области.

Температура точки излома температурного графика $t_{и} = -8,5$ °С.

Соотношение максимального потока теплоты на ГВС $Q_{ГВС}^{max} = 0,1593$ МВт и максимального потока теплоты на отопление $Q'_0 = 0,1948$ МВт для потребителя «Гараж» составляет $Q_{ГВС}^{max} / Q'_0 = 0,81$. Для исключения влияния неравномерности потребления ГВС на тепловой режим здания СП 41-101 при таком соотношении тепловых нагрузок рекомендует использовать двухступенчатую смешанную схему присоединения нагрузки ГВС и стабилизацию расхода сетевой воды на абонентском вводе, осуществляемую установкой регулятора перепада давления, что не было реализовано на практике.

ТГР разделяет тепловую сеть на два контура: первичный – контур внешней сетевой воды; вторичный – состоящий из контура отопления и внешнего контура ГВС. Во вторичных контурах для циркуляции теплоносителя в системе отопления установлен насос UPS-32-55, в системе горячего водоснабжения – UPS-32-100.

Схема проведения эксперимента для проверки гидравлически устойчивого регулирования тепловой нагрузки на систему отопления, а также исключения влияния переменной нагрузки ГВС для потребителя с неизменным гидравлическим сопротивлением отопительных систем с применением в системах централизованного теплоснабжения ТГР в ИТП в качестве схемы присоединения абонентских теплоснабжающих установок представлена на рис. 1.

Геометрические размеры экспериментального образца ТГР, установленного в ИТП «Гараж», следующие: $d_{igr} = 0,207$ м; $d_{is1} = d_{is2} = 0,1$ м; $d_o = d_{gws} = 0,05$ м; $L_1 = L_7 = 0,12$ м; $L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = 0,17$ м.

Изменение расходов во вторичных контурах потребителей тепловой нагрузки отопления и ГВС осуществлялось переключателем диапазона числа оборотов электродвигателя насосов I, II, III. Измерение расходов в первичном и вторичных контурах измерялось ультразвуковым расходомером, место установки которого показано на рис. 1. Во время проведения экспериментальных исследований использованы переносные приборы энергоаудита центра коллективного пользования ИГЭУ: ультразвуковой расходомер PORTOFLOW-330, ультразвуковой толщиномер DX-1, тепловизор NEC TH-7700.

Испытания происходили в период «излома» температурного графика. Расчетный суммарный расход сетевой воды на отопление и ГВС в период «излома» составил $G_{ts}^p = 12,2$ т/ч. Проводились четыре серии эксперимента. В каждой серии по три опыта.

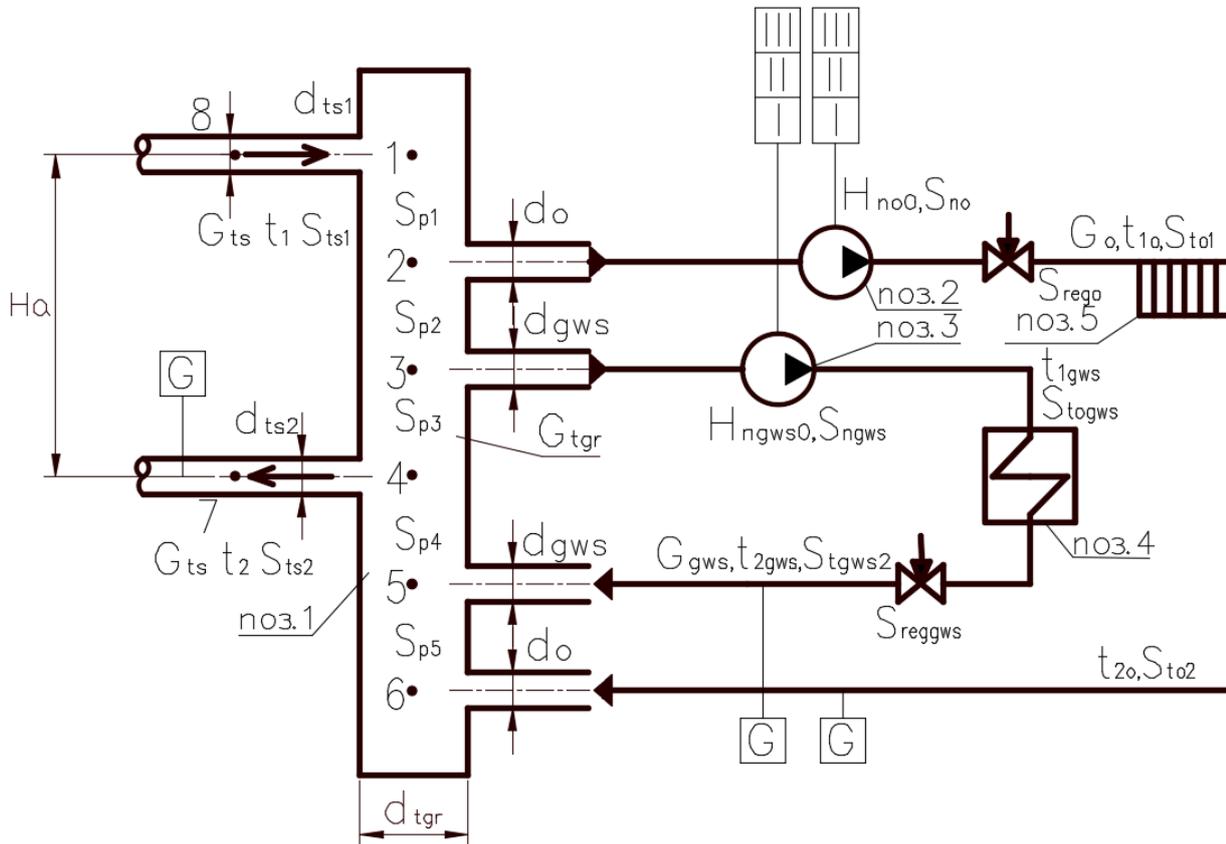


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального образца ТГР в ИТП «Гараж»: поз.1 – термогидравлический распределитель; поз. 2 – циркуляционный насос системы отопления; поз. 3 – циркуляционный насос системы ГВС; поз. 4 – пластинчатый теплообменник системы ГВС; поз. 5 – система отопления; G – место установки накладного ультразвукового расходомера; I, II, III – число оборотов электродвигателя циркуляционных насосов отопления и ГВС; t_0 – температура сетевой воды, поступающей в контур системы отопления; t_{1gws} – температура сетевой воды, поступающей в контур системы ГВС; d_{tgr} – внутренний диаметр ТГР; d_{ts1} , d_{ts2} – внутренний диаметр подающего и обратного трубопроводов внешней тепловой сети; d_o , d_{gws} – внутренние диаметры подводящих и отводящих трубопроводов к системам отопления и ГВС

В первой серии экспериментальных исследований ТГР число оборотов электродвигателя циркуляционного насоса отопления установлено в положении I, во второй – II, в третьей – III. Число оборотов электродвигателя циркуляционного насоса ГВС в опытах № 1–3, 4–6, 7–9 изменялось соответственно – III, II, I. Ультразвуковым расходомером фиксировалось значение расходов сетевой воды в первичном контуре сетевой воды и во вторичных контурах отопления и ГВС. Во время первой, второй и третьей серии испытаний на абонентском вводе ИТП перед ТГР установлена дроссельная диафрагма диаметром 30 мм. Расход сетевой воды, поступающий на абонентский ввод ИТП «Гараж» с диафрагмой 30 мм, составил $G_{ts} = 15,0$ т/ч, что выше расчетного значения на 2,8 т/ч. Во время четвертой серии испытаний на абонентском вводе ИТП перед ТГР установлена дроссельная диафрагма диаметром 17,3 мм. Расход сетевой воды, поступающей на абонентский ввод ИТП «Гараж» с диафрагмой 17,3 мм, составил $G_{ts} = 5,0$ т/ч, что существенно ниже расчетного суммарного расхода теплоносителя абонента.

Математическая модель экспериментального образца ТГР, установленного в ИТП «Гараж» в качестве схемы присоединения абонентских установок, описывается системой уравнений, основанной на аналогах первого и второго законов Кирхгофа [11]:

$$\{f_1 = 0, f_2 = 0, f_3 = 0, f_4 = 0, f_5 = 0, f_6 = 0, \quad (1)$$

где f_1 – уравнение потерь напора в контуре ввода в ИТП; f_2 – уравнение потерь напора контура системы отопления; f_3 – уравнение потерь напора подогрева воды на ГВС; f_4 – уравнение теплового баланса в точке 4; f_5 – уравнение теплового баланса в точке 5; f_6 – уравнение баланса масс в ТГР:

$$f_1 = (S_{tk1} + S_{p1} + S_{tk2}) G_{ts} \cdot |G_{ts}| + S_{p2} (G_{ts} - G_o) \times |G_{ts} - G_o| + S_{p3} G_{tgr} \cdot |G_{tgr}| - H_a; \quad (2)$$

$$f_2 = (S_{to1} + S_{rego} + S_{p5} + S_{to2} + S_{no}) \times G_o \cdot |G_o| + S_{p4} (G_o - G_{gws}) \cdot |G_o - G_{gws}| - S_{p3} G_{tgr} \cdot |G_{tgr}| - S_{p2} (G_{ts} - G_o) \cdot |G_{ts} - G_o| - H_{no0}, \quad (3)$$

где S_{rego} – сопротивление, создаваемое балансировочным клапаном системы отопления, $(m \cdot c^2)/t^2$, задачей которого является поддержа-

ние в расчетном значении рабочей точки циркуляционного насоса системы отопления и сети;

$$f_3 = (S_{tgws1} + S_{togws} + S_{ngws} + S_{tgws2} + S_{reggws}) G_{gws} \cdot |G_{gws}| + S_{p4} (G_o - G_{gws}) \times |G_o - G_{gws}| - S_{p3} G_{tgr} \cdot |G_{tgr}| - H_{ngws0}, \quad (4)$$

где S_{reggws} – сопротивление, создаваемое балансировочным клапаном во вторичном контуре системы ГВС, $(\text{м} \cdot \text{ч}^2)/\text{т}^2$, задачей которого является поддержание в расчетном значении рабочей точки циркуляционного насоса системы ГВС;

$$f_4 = (G_o + G_{gws}) c_5 t_5 + G_{tgr} c_1 t_1 - G_{ts} c_7 t_2; \quad (5)$$

$$f_5 = G_o c_{2o} t_{2o} + G_{gws} c_{2gws} t_{2gws} - (G_o + G_{gws}) c_5 t_5; \quad (6)$$

$$f_6 = G_{ts} - G_o - G_{gws} - G_{tgr}. \quad (7)$$

Решение целевых функций (1) определяет значения величин G_{ts} , S_{reggws} , S_{reggws} , t_2 , t_5 , G_{tgr} .

Результаты исследования. В табл. 1 представлены результаты испытаний ТГР в ИТП «Гараж».

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований ТГР в ИТП «Гараж»

№ серии эксперимента	№ опыта	G_{ts} , т/ч	Отопление		ГВС		Суммарный расход $G_o + G_{gws}$, т/ч
			Диапазон числа оборотов эл. двигателя насоса системы отопления	G_o , т/ч	Диапазон числа оборотов эл. двигателя насоса системы ГВС	G_{gws} , т/ч	
1	1	15,1	I	3,5	III	м	7,4
	2	14,8	I	3,6	II	3,7	7,3
	3	14,8	I	3,5	I	2,9	6,4
2	4	15,3	II	5,5	III	3,8	9,3
	5	15,2	II	5,4	II	3,6	9,0
	6	15,2	II	5,6	I	2,8	8,4
3	7	15,1	III	6,8	III	3,8	10,6
	8	15,0	III	6,7	II	3,6	10,3
	9	14,9	III	6,6	I	2,9	9,5
4	10	4,9	III	6,8	III	4,0	10,8
	11	5,1	III	6,7	II	3,6	10,3
	12	5,0	III	6,7	I	2,8	9,5

Условия проведения эксперимента. В положении III числа оборотов электродвигателя насоса системы отопления расход воды во вторичном контуре системы отопления в среднем составляет $G_o = 6,7$ т/ч, что соответствует наружным температурам в диапазоне от точки «излома» температурного графика $t_{ти} = -8,5$ °C до расчетной температуры наружного воздуха для отопления $t_{но} = -30$ °C. Моделирование количественного регулирования расхода сетевой воды в системе отопления в период «излома» температурного графика происходит переключением числа оборотов электродвигателя в положение II и I, расход воды в системе отопления составляет при этом $G_o = 5,4$ т/ч и $G_o = 3,5$ т/ч, что соответствует температуре наружного воздуха $t_{н} = -6,0$ °C и $t_{н} = -2,0$ °C.

Моделирование неравномерности потребления ГВС в течение суток происходит с помощью переключения числа оборотов электродвигателя насоса ГВС. В положении III числа оборотов расход воды во вторичном контуре ГВС в среднем составляет $G_{gws} = 3,9$ т/ч, что соответствует максимальному коэффициенту часовой неравномерности $k_h = 2,4$. В положении II и I расход воды на ГВС составляет $G_{gws} = 3,7$ т/ч и $G_{gws} = 2,9$ т/ч, что соответствует $k_h = 2,3$ и $k_h = 1,8$.

В табл. 2, 3 приведены результаты решения целевых функций (1), соответствующие условиям проведения экспериментальных исследований ТГР в ИТП «Гараж».

Таблица 2. Результаты математического моделирования ТГР в ИТП «Гараж» ($H_a = 0,26$)

$t_{н}$, °C	G_{ts} , т/ч	G_o , т/ч	G_{gws} , т/ч	$G_o + G_{gws}$, т/ч	G_{tgr} , т/ч
$k_h = 2,4$					
-8,5	15,0	6,7	3,9	10,6	4,4
-6	15,0	5,2	3,9	9,1	5,9
-2	15,0	3,5	3,4	7,4	7,6
$k_h = 2,3$					
-8,5	15,0	6,7	3,3	10,0	5,0
-6	15,0	5,2	3,3	8,5	6,5
-2	15,0	3,5	3,3	6,8	8,2
$k_h = 1,8$					
-8,5	15,0	6,7	2,8	9,5	5,5
-6	15,0	5,2	2,8	8,0	7,0
-2	15,0	3,5	2,8	6,3	8,7

Теоретические исследования физических процессов, происходящих при работе ТГР

в ИТП, показывают, что в результате активного регулирования теплового потока на отопление и (или) неравномерности потребления ГВС в течение суток и при условии $G_{ts} > G_o + G_{gws}$ неусвоенная часть сетевой воды $G_{igr} = G_{ts} - (G_o + G_{gws})$ проходит транзитом через ТГР из точки 3 к точке 4 (рис. 1), смешиваясь с потоками воды после систем отопления и подогревателя ГВС вторичного контура. При суммарном расходе воды во вторичном контуре ($G_o + G_{gws}$), превышающем расход сетевой воды G_{ts} , произойдет реверсивное изменение потока теплоносителя G_{igr} из точки 4 к точке 3 (рис. 1), что может привести к понижению температуры подачи воды во вторичные контуры.

Таблица 3. Результаты математического моделирования ТГР в ИТП «Гараж» ($H_a = 0,03$)

$t_h, ^\circ\text{C}$	$G_{ts}, \text{т/ч}$	$G_o, \text{т/ч}$	$G_{gws}, \text{т/ч}$	$G_o + G_{gws}, \text{т/ч}$	$G_{igr}, \text{т/ч}$
$k_u = 2,4$					
-8,5	5,1	6,7	3,9	10,6	-5,5
-6	5,1	5,2	3,9	9,1	-4,0
-2	5,1	3,5	3,4	7,4	-2,3
$k_u = 2,3$					
-8,5	5,1	6,7	3,3	10,0	-4,9
-6	5,1	5,2	3,3	8,5	-3,4
-2	5,1	3,5	3,3	6,8	-1,7
$k_u = 1,8$					
-8,5	5,1	6,7	2,8	9,2	-4,1
-6	5,1	5,2	2,8	8,0	-2,9
-2	5,1	3,5	2,8	6,3	-1,2

На рис. 2 представлен сравнительный анализ результатов математического моделирования процесса теплоснабжения ИТП с ТГР и проведенных экспериментов.

Во время первых трех серий экспериментов с диафрагмой диаметром 30 мм суммарный расход воды во вторичных контурах ($G_o + G_{gws}$) изменялся от 6,4 до 10,6 т/ч, при этом расход сетевой воды в первичном контуре G_{ts} с температурой $t_1 = 64,0$ составлял 15,0 т/ч. На рис. 2,а показана термограмма ТГР третьей серии испытаний опыта №9 с максимальными расходами сетевой воды во вторичных контурах. Наблюдается равномерный прогрев верхней части ТГР, температура сетевой воды во вторичные контуры на систему отопления составляет $t_{1o} = 63,8$ °С (т. В) и ГВС $t_{1gws} = 63,7$ °С (т. С), что практически соответствует температуре $t_1 = 64,0$ (т. А) в пределах погрешности измерения.

В четвертой серии опытов суммарный расход воды во вторичных контурах ($G_o + G_{gws}$) превышал расход сетевой воды от источника G_{ts} . На рис. 2,б показаны термограммы ТГР четвертой серии испытаний опыт №12 с максимальными расходами сетевой воды на систему отопления. За счет организации реверсивного потока охлажденной воды из нижней части ТГР происходит охлаждение сетевой воды на вводе вторичного контура отопления ($t_{1o} = 63,0$ °С (т. В)) и ГВС $t_{1gws} = 52,6$ °С (т. С).

На рис. 3 изображены графики распределения температур сетевой воды в ТГР третьей серии испытаний опыта №9 и четвертой серии испытаний опыта №12.

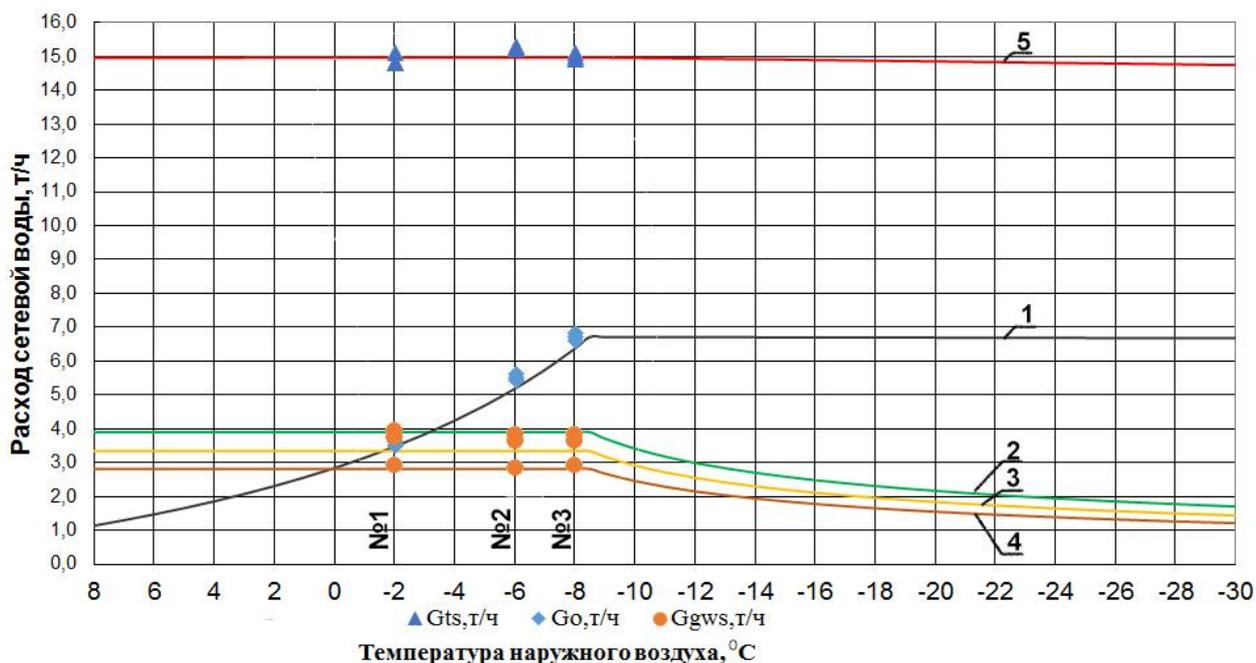


Рис. 2. Результаты сопоставления математического моделирования и эксперимента: 1 – график изменения расхода сетевой воды на отопление; 2, 3, 4 – графики изменения расхода сетевой воды на ГВС при $k_u = 2,4$, $k_u = 2,3$ и $k_u = 1,8$; 5 – график расхода сетевой воды первичного контура теплосети; №1, №2, №3 – номер серии эксперимента

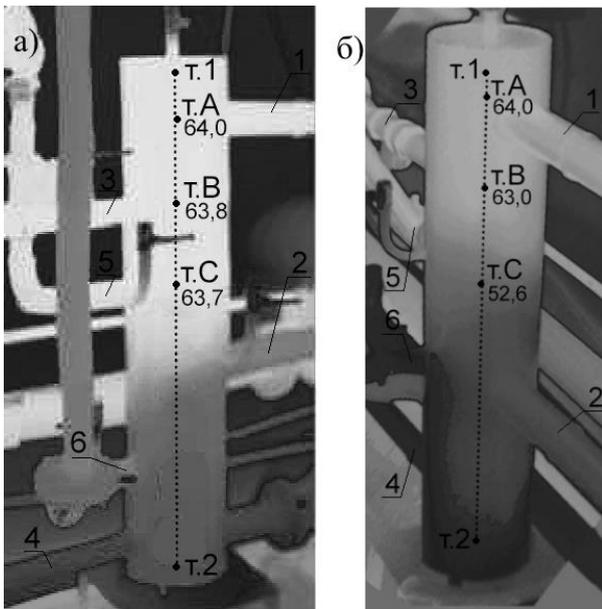


Рис. 3. Термограмма экспериментального образца ТГР: а – третья серия испытаний, опыт №9; б – четвертая серия испытаний, опыт №12; 1, 2 – подающий и обратный трубопроводы первичного контура сетевой воды; 3, 4 – подающий и обратный трубопроводы вторичного контура отопления; 5, 6 – подающий и обратный трубопроводы вторичного контура ГВС; т. 1 – верх ТГР; т. 2 – низ ТГР

По результатам экспериментальных исследований первой, второй и третьей серии испытаний (табл. 1) построены аппроксимирующие функции изменения расхода воды на отопление от изменения расхода воды на ГВС (рис. 4), а также аппроксимирующая функция изменения расхода сетевой воды первичного контура теплосети от изменения расхода воды во вторичных контурах (рис. 5).

Анализ результатов математического моделирования (рис. 2) и эксперимента (рис. 5, 6) показывает, что изменение расхода воды на ГВС во внешнем вторичном контуре не оказывает влияния на расход воды, поступающей в систему отопления абонента. При количественном регулировании в ИТП расхода сетевой воды, поступающей в систему отопления G_o в период «излома» температурного графика, а также расхода сетевой воды на ГВС G_{gws} расход сетевой воды в первичном контуре G_{ts} остается практически постоянным.

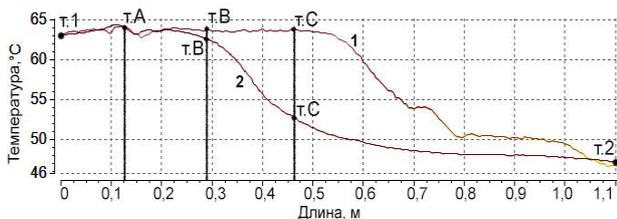


Рис. 4. График распределения температур сетевой воды в ТГР: 1 – третья серия испытаний, опыт №9; 2 – четвертая серия испытаний, опыт №12

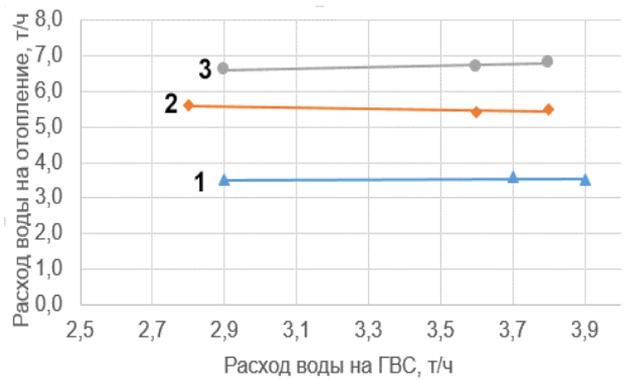


Рис. 5. Аппроксимирующие функции изменения расхода воды на отопление при изменении расхода воды на ГВС первой, второй и третьей серии испытаний: 1 – опыты № 1–3; 2 – опыты № 4–6; 3 – опыты № 7–9

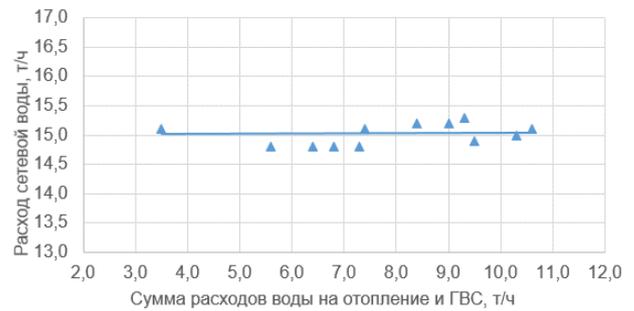


Рис. 6. Аппроксимирующая функция изменения расхода сетевой воды в первичном контуре при изменении расходов воды во вторичных контурах первой, второй и третьей серии испытаний

На рис. 7 изображен экспериментальный образец термогидравлического распределителя, установленный в индивидуальном тепловом пункте «Гараж».

Выводы. Результаты экспериментальных исследований применения ТГР в системе централизованного теплоснабжения в качестве новой схемы присоединения теплопотребляющих абонентских установок показали независимость расходов в контурах друг от друга. При изменении расхода в одном из контуров потребителей расходы в других контурах практически не изменялись, что подтвердило предположение о гидравлической независимости контуров.



Рис. 7. Экспериментальный образец термогидравлического распределителя, установленный в индивидуальном тепловом пункте «Гараж»

Список литературы

1. Байбаков С.А., Фаликов К.С. О возможности регулирования элеваторных узлов систем отопления // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 7(119) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://Tech_stat/stat_shablon.php?id=2789.
2. Ильин В.К. Малозатратное решение по ликвидации перетопов в системах отопления // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 5(129). – С. 45–50.
3. Зорченко Н.В., Каленская М.К. Результаты исследования схем регулирования отопительной нагрузки с элеваторным присоединением // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 7(131). – С. 26–28.
4. Разоренов Р.Н. Регулирование теплопотребления в малоэтажных зданиях существующей застройки // Энергосбережение. – 2017. – № 8. – С. 40–45.
5. Ливчак В.И. Энергосбережение в системах централизованного теплоснабжения на новом этапе развития // Энергосбережение. – 2000. – № 2. – С. 4–9.
6. Барон В.Г. Всегда ли минимизация температуры обратного теплоносителя способствует энергосбережению? // Энергосбережение. – 2016. – № 4. – С. 16–20.
7. Гершкович В.Ф. Результаты внедрения системы гидравлически устойчивого регулирования // Энергосбережение. – 2010. – № 6. – С. 58–61.
8. Наумчик Е.М. Оптимизация системы теплоснабжения Минска // Энергосбережение. – 2011. – № 1. – С. 60–65.
9. Гершкович В.Ф. Особенности гидравлически устойчивого регулирования теплового потока у

потребителей тепловой сети // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 11(111). – С. 47–50.

10. Гершкович В.Ф. Прошедшее, настоящее и будущее время двухступенчатого подогрева горячей воды // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 9(133). – С. 45–49.

11. Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Сенников В.В. Устройство для повышения эффективности работы централизованной системы теплоснабжения // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 17–25.

References

1. Baybakov, S.A., Falikov, K.S. O vozmozhnostyakh regulirovaniya elevatorykh uzlov sistem otopeniya [On the possibility to regulate elevator nodes of heating systems]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2010, no. 7(119). Available at: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2789.
2. Il'in, V.K. Malozatratnoe reshenie po likvidatsii peretopov v sistemakh otopeniya [A low-cost solution to eliminate overheating in heating systems]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2011, no. 5 (129), pp. 45–50.
3. Zorchenko, N.V., Kalenskaya, M.K. Rezul'taty issledovaniya skhem regulirovaniya otopitel'noy nagruzki s elevatornym prisoedineniem [The results of the study of heating load regulation schemes with an elevator connection]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2011, no. 7(131), pp. 26–28.
4. Razorenov, R.N. Regulirovanie teplopotrebleniya v maloetazhnykh zdaniyakh sushchestvuyushchey zastroйки [Regulation of heat consumption in existing low-rise buildings]. *Energoberezhenie*, 2017, no. 8, pp. 40–45.
5. Livchak, V.I. Energoberezhenie v sistemakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya na novom etape

razvitiya [Energy saving in the systems of centralized heat supply at a new stage of development]. *Energoberezheniye*, 2000, no. 2, pp. 4–9.

6. Baron, V.G. Vsegda li minimizatsiya temperatury obratnogo teplonosatelya sposobstvuet energosberezheniyu? [Is return coolant temperature minimization always a way to saving energy?]. *Energoberezhenie*, 2016, no. 4, pp. 16–20.

7. Gershkovich, V.F. Rezul'taty vnedreniya sistemy gidravlicheski ustoychivogo regulirovaniya [Results of introduction of the hydraulically stable regulation system]. *Energoberezhenie*, 2010, no. 6, pp. 58–61.

8. Naumchik, E.M. Optimizatsiya sistemy teplosnabzheniya Minska [Optimization of Minsk heat supply system]. *Energoberezhenie*, 2011, no. 1, pp. 60–65.

9. Gershkovich, V.F. Osobennosti gidravli-cheski ustoychivogo regulirovaniya teplovogo potoka u potrebiteley teplovoj seti [Features of the hydraulically stable regulation of the heat flow in the heating network consumers]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2009, no. 11(111), pp. 47–50.

10. Gershkovich, V.F. Proshedshee i budushchee vremya dvukhstupenchatogo podogreva goryachey vody [The past, present and future of two-stage hot water heating]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2011, no. 9(133), pp. 45–49.

11. Smimov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Sennikov, V.V. Ustroystvo dlya povysheniya effektivnosti raboty tsentralizovannoy sistemy teplosnabzheniya [The device for increasing the efficiency of the centralized heating system]. *Vestnik IGEU*, 2018, no. 5, pp. 17–25.

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, 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, доцент кафедры промышленных теплоэнергетических систем,
адрес: г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14,
телефон (495) 362-75-53,
e-mail: yavorovskyYV@mpei.ru

Yavorovsky Yuri Viktorovich,

National Research University (Moscow Power Engineering Institute),
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Industrial Heat and Power Systems,
address: Moscow, Krasnokazarmennaya St., house 14,
telephone (495) 362-75-53,
e-mail: yavorovskyYV@mpei.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 Vasilyevich,

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