УДК 697.341

Владимир Владимирович Смирнов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: kbispu@mail.ru

Юрий Викторович Яворовский
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ», кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: y1000@list.ru

Мария Владимировна Козлова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Николай Николаевич Смирнов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Сергей Ильич Шувалов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Методика анализа экономической эффективности от применения термогидравлического распределителя в тепловых пунктах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Результаты анализа применения термогидравлического распределителя в тепловых пунктах позволяют говорить о недостаточности исследований эффективности предлагаемой схемы по сравнению с классическими и современными схемами присоединения абонентов в системе централизованного теплоснабжения. Необходимо теоретически обосновать и количественно оценить факторы, определяющие технико-экономическую эффективность применения термогидравлического распределителя в схемах тепловых пунктов, а также установить граничные параметры их эффективной эксплуатации. Задача эта является актуальной и имеет важное практическое значение.
Материалы и методы. Экономическая эффективность определена с использованием методов вариантных расчетов с применением разработанных программ для ЭВМ. Обработка результатов осуществлена методами математической статистики с использованием регрессионного анализа.
Результаты. Разработана методика определения экономической эффективности применения термогидравлического распределителя в тепловом пункте при различных температурных графиках. Предложены номограммы, позволяющие оценить экономический эффект от внедрения термогидравлического распределителя в тепловой пункт. Установлено, что максимальную эффективность можно получить в низкотемпературных и низконапорных системах теплоснабжения, потребители которых не оборудованы авторегуляторами теплового потока.
Выводы. Выявлено, что экономическая эффективность от применения схемы с термогидравлическим распределителем в системах теплоснабжения с количественным и качественно-количественным регулированием отсутствует.

Ключевые слова: термогидравлический распределитель, автоматизированный индивидуальный тепловой пункт, система централизованного теплоснабжения, технико-экономическая эффективность

Vladimir Vladimirovich Smirnov
Ivanovo State Power University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kbispu@mail.ru

Yuri Viktorovich Yavorovsky
National Research University (Moscow Power Engineering Institute), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of Industrial Heat Power Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: y1000@list.ru

Maria Vladimirovna Kozlova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

© Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Козлова М.В., Смирнов Н.Н., Шувалов С.И., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 20–30.

Nikolay Nikolaevich Smirnov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Sergei Ilyich Shuvalov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Methodology to analyze the economic efficiency of using a thermohydraulic distributor in heat substations

Abstract

Background. An analysis of the use of thermohydraulic distributors in heat substations has revealed a lack of research of the efficiency of the proposed configuration compared to conventional and modern consumer connection schemes in district heating systems. It is necessary to provide a theoretical basis and a quantitative assessment of the factors determining the techno-economic efficiency of using thermohydraulic distributors in heat substation layouts, as well as to establish the operational limits of their effective use. This task is timely and holds significant practical importance.
Materials and methods. Economic efficiency has been determined using comparative calculation methods and specially developed computer programs. The results have been processed using mathematical statistical methods and specifically regression analysis.
Results. A methodology has been developed to determine the economic efficiency of using a thermohydraulic distributor in a heat distribution unit under various temperature schedules. Nomograms are proposed to estimate the economic impact of implementing such a distributor. It has been established that maximum efficiency is achieved in low-temperature, low-pressure district heating systems where consumer units lack automatic heat flow controllers.
Conclusions. It has been determined that there is no economic benefit to using a scheme with a thermohydraulic distributor in heat supply systems employing quantitative or combined qualitative-quantitative regulation.

Key words: thermohydraulic distributor, automated individual heat substation, district heating system, techno-economic efficiency

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.020-030

Введение. Как показано в [1, 2, 3, 4], внедрение термогидравлического распределителя (ТГР) обеспечивает гидравлическую автономность контуров отопления и горячего водоснабжения (ГВС). Это позволяет осуществлять их присоединение к тепловым сетям на основе принципа несвязанного регулирования, исключающего взаимное влияние потоков.

Применение схемы с ТГР требует циркуляции максимального расчетного расхода воды в тепловой сети в течение всего отопительного периода, но при этом практически «нулевого» располагаемого напора у абонента. Классические схемы присоединения абонентов, подключенных к тепловой сети по принципу несвязанного регулирования теплоты, характеризуются переменным расходом сетевой воды, но при этом располагаемый напор у потребителя должен быть достаточен для функционирования системы отопления при максимальном открытии клапана, регулирующего температуру воды на ГВС.

В [1] представлены результаты сравнительного анализа технико-экономических показателей классических схем присоединения абонента и схем с ТГР для отопительных температурных графиков 150/70 °С, 95/70 °С при одинаковом сопротивлении сети S_c и центральном регулировании теплоты. В результате исследования было установлено, что по общим затратам (топлива и электроэнергии на перекачку теплоносителя) за счет устранения «перетопа» схема с ТГР экономичнее для обоих температурных графиков.

Следует отметить, что сравнение показателей было выполнено на частном примере: соотношение максимальных тепловых нагрузок ГВС и отопления $\rho_{max} = Q_{гвс}^{max} / Q'_{о} = 0,48$; максимальный коэффициент часовой неравномерности потребления ГВС $к_ч = 2,4$.

Согласно СП 510.1325800[1], значения $к_ч$, в зависимости от числа жителей в жилых зданиях, могут колебаться от 2,4 (20000 человек) до 5,15 (150 человек). Кроме того, указанные значения $к_ч$ различаются в разы для зданий различного вида и назначения, режимов работы, степени благоустроенности жилых сооружений, местных условий и др., например: $к_ч$ для торгового центра – около 7,5; жилых сооружений квартирного типа – около 2,0; промышленных предприятий различного рода – от 2 до 9,0. В реальной тепловой сети значения соотношения $Q_{гвс}^{max} / Q'_{о}$ у потребителей также могут различаться.

В настоящее время в целях повышения эффективности использования энергоресурсов

[1] СП 510.1325800.2022. Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения: свод правил: утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 03.03.2022 № 143/пр: дата введения 04.04.2022 (с изм. № 1, 2026 г.). – М.: Минстрой России, 2022. – 124 с.

при реконструкции тепловых пунктов применяют средства автоматического регулирования теплоты – автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (АИТП) [5, 6, 7]. Эффективность применения АИТП основана на том, что контроллер регулирует необходимое потребителю количество сетевой воды. Функционирование средств регулирования теплоты в АИТП в период «излома» температурного графика способствует устранению «перетопа» и снижению расхода электроэнергии на перекачку теплоносителя. Полное оснащение всех потребителей теплоты АИТП способствует переходу на количественное регулирование тепловой нагрузки, при котором роль центрального регулирования сводится к корректировке параметров теплоносителя (давления и расхода) на коллекторах теплоисточника в зависимости от параметров теплоносителя на абонентских вводах [8, 9].

Таким образом, возникает актуальная задача определить границы возможного применения схемы с ТГР в тепловых пунктах. Критерием ограничения является относительное изменение общих затрат на производство теплоты и транспортировку теплоносителя в схемах с ТГР по сравнению с классическими и современными схемами присоединения абонента.

Ниже представлен сравнительный анализ схем с ТГР с наиболее распространенными классическими схемами присоединения: 1) зависимая с насосом смешения на перемычке и одноступенчатым (параллельная) присоединением подогревателя ГВС; 2) зависимая с насосом смешения на перемычке и двухступенчатым (смешанная) присоединением подогревателя ГВС. В качестве схемы АИТП рассмотрена зависимая с насосом смешения на перемычке и параллельным присоединением подогревателя ГВС.

Методы исследования. По разработанной программе для ЭВМ [10] методом вариантных расчетов выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей теплоснабжения потребителя при различных значениях $\kappa_ч$, $Q_{гвс}^{max} / Q'_о$ и ΔH_c (сумма потерь напора в подающем и обратном трубопроводе) для климатических условий Ивановской области.

Располагаемый напор на выходе из источника теплоснабжения определяли по формуле

$$\Delta H_{ист} = \Delta H_{аб}^{min} + \Delta H_c, \qquad (1)$$

где $\Delta H_{аб}^{min}$ – минимальный располагаемый напор на абонентском вводе (при максимальном расходе сетевой воды на ГВС), м вод.ст.; ΔH_c – потери напора в тепловой сети при максимальном расходе сетевой воды (в точке «излома» температурного графика при нагрузке $Q'_о + Q_{гвс}^{max}$), м вод.ст.; $Q'_о$ – расчетная тепловая нагрузка на отопление; $Q_{гвс}^{max}$ – максимальная тепловая нагрузка на ГВС (для двухступенчатой смешанной схемы определяется второй ступенью).

Располагаемый напор $\Delta H_{ист}$ остается неизменным при различных значениях $\kappa_ч$ и $Q_{гвс}^{max} / Q'_о$. Значения минимальных располагаемых напоров на абонентском вводе $\Delta H_{аб}^{min}$ принимали следующими: для классических схем – 5 м вод.ст.[2] (как минимальный располагаемый напор для преодоления сопротивления подогревателя ГВС); при непосредственном присоединении – 6 м вод.ст. (с учетом потерь напора в местной системе отопления 1 м вод.ст.); для схемы с ТГР – 0,067 м вод.ст. (потери напора в ТГР); для АИТП – 15 м вод.ст. (с учетом потерь напора в регулирующем клапане). Недогрев воды в первой ступени двухступенчатой смешанной схемы принят 5 °С.

Годовой расход электроэнергии на перекачку теплоносителя, кВт · ч, определяли по формуле

$$Э = \frac{\Delta H_{ист} \sum G_i z_i}{3{,}6 \cdot 102 \cdot \eta}, \qquad (2)$$

где G_i – расход сетевой воды, т/ч, при числе часов работы системы в году z_i [3]; η – КПД насосной установки.

Расход сетевой воды составляет

$G_i = G_о + G_{гвс,i}$,

где $G_о$ – расход воды на систему отопления, т/ч; $G_{гвс,i}$ – расход воды на систему ГВТ, т/ч (для классических схем $G_{гвс,I}$ определяли при средней нагрузке на ГВС $Q_{гвс}^{ср}$, для схемы с ТГР – при максимальной $Q_{гвс}^{max}$).

Затраты теплоты на «перетоп» для классических схем присоединения абонентов определяли с помощью уравнения характеристики системы отопления, предложенного проф. Е.Я. Соколовым.

Относительное изменение затрат на производство теплоты и транспортировку теплоносителя (экономическая эффективность) находили по формуле

$$ТС = \frac{ТС_1 - ТС_2}{ТС_2} \cdot 100\ \%, \qquad (3)$$

где $ТС_2$ – затраты на производство теплоты и транспортировку теплоносителя сравниваемой схемы, тыс. руб.; $ТС_1$ – затраты на производство теплоты и транспортировку теплоносителя схемы с ТГР, тыс. руб.

[2] СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003: национальный стандарт Российской Федерации: утв. Приказом Минрегионразвития РФ от 30.06.2012 № 280: введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 70 с.

[3] Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99* / под ред. чл.-кор. В.К. Савина. – М.: НИИ строительной физики РААСН, 2006. – 258 с.

Стоимость энергоресурсов для производства теплоты и транспортировки теплоносителя различается в зависимости от региона и времени. В связи с этим для универсальности был введен коэффициент, представляющий собой отношение стоимости электрической энергии $T_э$, руб/кВт·ч, и топлива $T_т$, руб/т (руб/м^3):

$$k_т = \frac{T_э}{T_т}. \quad (4)$$

Таким образом, при $TC > 0$ будет наблюдаться положительная экономическая эффективность от применения схемы с ТГР. При $TC < 0$ применение схемы с ТГР приведет к отрицательной экономической эффективности.

В ходе расчета задавались произвольным значением расчетных потерь напора в сети для схемы с ТГР ΔH_{c1}, а также $k_т$, Q'_o, $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$, $\kappa_ч$, при этом определялись следующие параметры: средняя нагрузка на ГВС $Q_{гвс}^{ср} = (Q_{гвс}^{max}/Q'_o)\cdot Q'_o/\kappa_ч$; сопротивление сети $S_c = \Delta H_{c1}/(G_o + G_{гвс}^{max})^2$; потери напора в сети для классической (современной) схемы ΔH_{c2} (при параллельном присоединении подогревателя ГВС $\Delta H_{c2} = \Delta H_{c1}$, при двухступенчатой смешанной – $\Delta H_{c2} < \Delta H_{c1}$ за счет меньшего расчетного расхода воды на ГВС); располагаемый напор на выходе из источника $\Delta H_{ист}$ по формуле (1) (в предложенном алгоритме при изменении соотношения $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$ сопротивление сети S_c изменяется, но $\Delta H_{ист}$ остается постоянным); годовой расход электроэнергии на перекачку теплоносителя по формуле (2); расход топлива B_1 и B_2; общие затраты производства теплоты TC_1 и TC_2; экономическая эффективность по формуле (3).

Алгоритм расчета выглядит следующим образом:

$$\begin{matrix} Q'_o \\ \Delta H_c \\ Q_{гвс}^{max}/Q'_o \end{matrix} \rightarrow Q_{гвс}^{ср} \rightarrow S_c \rightarrow \Delta H_{c2} \rightarrow \begin{matrix} \kappa_ч \\ k_т \end{matrix} \quad (5)$$

$$\rightarrow \begin{matrix} \Delta H_{ист1} \\ \Delta H_{ист2} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} Э_1 \\ Э_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} TC_1 \\ TC_2 \end{matrix} \rightarrow TC$$

В соответствии с этим алгоритмом, абсолютные значения TC_1 и TC_2 изменяются в зависимости от расчетной нагрузки на отопление Q'_o, но их относительное значение TC остается неизменным. Такой подход позволяет построить зависимости $TC = f(\Delta H_{c1}, Q_{гвс}^{max}/Q'_o, \kappa_ч, k_т)$.

Результаты исследования. На рис. 1 и 2 показано изменение экономической эффективности схемы с ТГР в тепловом пункте в зависимости от $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$ при различных $\kappa_ч$ и ΔH_{c1}, но при фиксированном $k_т = 0{,}83$ в сравнении с классическими схемами присоединения абонентов.

Значения $\kappa_ч = 1$ (равномерное потребление ГВС) и $\kappa_ч = 100$ в эксплуатации практически не наблюдаются, но они наглядно показывают изменения значений TC в диапазоне $1 \le \kappa_ч \le 100$.

На графиках значения относительного изменения затрат на производство теплоты и транспортировку теплоносителя ТС при $Q_{гвс}^{max}/Q'_o = 0$ будет означать, что нагрузка ГВС отсутствует и в классической схеме присоединения «перетопа» не будет. Общие затраты на производство теплоты сравниваемых схем будут различаться только значениями затрат на перекачку теплоносителя, разница между которыми при качественном регулировании будет определяться значением $\Delta H_{аб}^{min}$.

В результате выполненных расчетов установлено, что экономическая эффективность от применения ТГР в тепловом пункте увеличивается:

– при уменьшении соотношения $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$;

– уменьшении расчетных потерь напора в тепловой сети ΔH_{c1};

– уменьшении коэффициента $k_т$.

Для различных значений ΔH_{c1} наблюдается соотношение $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$, при котором значения TC остаются практически неизменными независимо от изменения $\kappa_ч$. В области левее $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$ значения TC увеличиваются при увеличении $\kappa_ч$, в области правее $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$ значения TC уменьшаются при увеличении $\kappa_ч$. В условиях эксплуатации тепловых сетей ($Q_{гвс}^{max}/Q'_o \le 2{,}0$, $\Delta H_{c1} \le 80$ м вод.ст.) для режима 95/70 °С характерна область значений TC левее соотношения $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$.

В результате анализа тарифов на электрическую энергию и природный газ для источников теплоснабжения по регионам России установлено, что коэффициент $k_т$ находится в диапазоне от 0,4 до 1,2. В связи с ростом цен на энергоресурсы в целом, указанный выше диапазон с течением времени будет оставаться практически одинаковым.

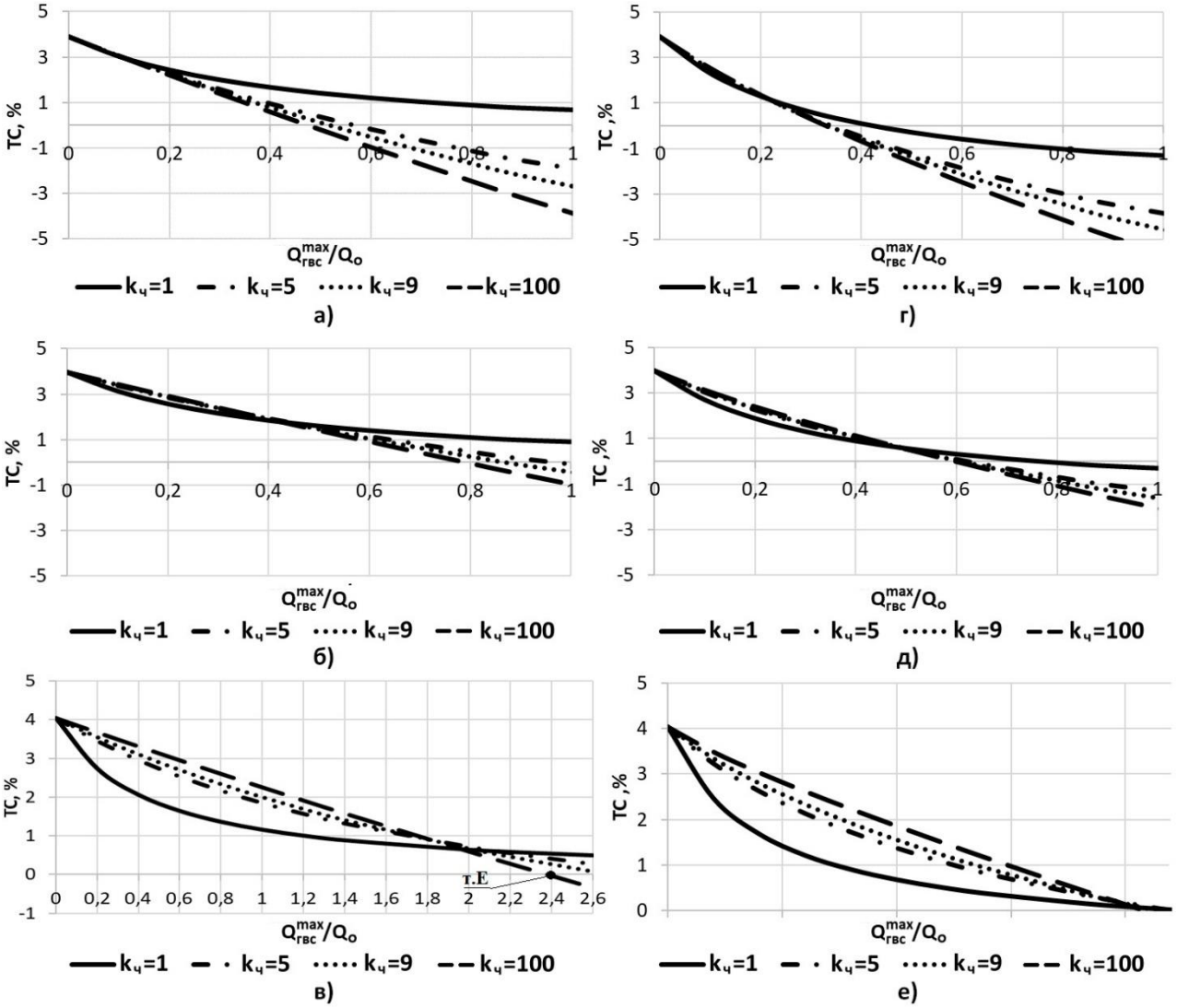


Рис. 1. Графики значений экономической эффективности при сравнении схемы с ТГР с классическими схемами с параллельным присоединением подогревателя ГВС (слева) и двухступенчатым смешанным присоединением подогревателя ГВС (справа) от изменения $Q_{гвс}^{max}/Q_o'$ и $\kappa_ч$, $k_т$ = 0,83 (температурный график 150/70 °С): а, г – $\Delta H_{c1}=50$ м вод.ст.; б, д – $\Delta H_{c1}=30$ м вод.ст.; в, е – $\Delta H_{c1}=10$ м вод.ст.

При фиксированном значении ΔH_{c1} и варьировании $k_т$ значения *ТС* будут изменяться. С уменьшением $k_т$, что говорит об использовании более дорогого топлива, эффективность от внедрения ТГР будет увеличиваться (рис. 3). При фиксированном $k_т$ и увеличении гидравлического сопротивления сети (потерь напора ΔH_{c1}) затраты на перекачку теплоносителя для схемы с ТГР из-за большего циркуляционного расхода воды будут увеличиваться быстрее, чем для сравниваемой схемы.

В результате исследования установлено, что для систем теплоснабжения с регуляторами расхода у абонентов существуют зависимости $\Delta H_{c1}=f(k_т)$, которым соответствует «семейство» функций $TC=f(Q_{гвс}^{max}/Q_o';\ \kappa_ч)$.

Результаты исследования температурного графика 150/70 °С. Моделям 1, 2, 3 на рис. 3,а соответствуют модели $TC=f(Q_{гвс}^{max}/Q_o';\ \kappa_ч)$ на рис. 3,б,в,г при сравнении схемы с ТГР со схемой с параллельным присоединением подогревателя ГВС. Средняя ошибка аппроксимации моделей $TC=f(Q_{гвс}^{max}/Q_o';\ \kappa_ч)$ составляет не более 15 %.

График *1* на рис. 3,а является граничной функцией расчетных значений ΔH_{c1} и $k_т$, при которых для всех соотношений $Q_{гвс}^{max}/Q_o'<2{,}0$ экономическая эффективность от внедрения схемы с ТГР будет положительной.

Если точка при расчетных значениях ΔH_{c1} и $k_т$ попадает выше графика *1*, то соотношение $Q_{гвс}^{max}/Q_o'$, при котором эффективность схемы с ТГР будет положительной при различных $\kappa_ч$, уменьшается. Так, графику *2* на рис. 3,а соответствуют соотношения $Q_{гвс}^{max}/Q_o'<0{,}8$, а графику *3* – $Q_{гвс}^{max}/Q_o'<0{,}4$.

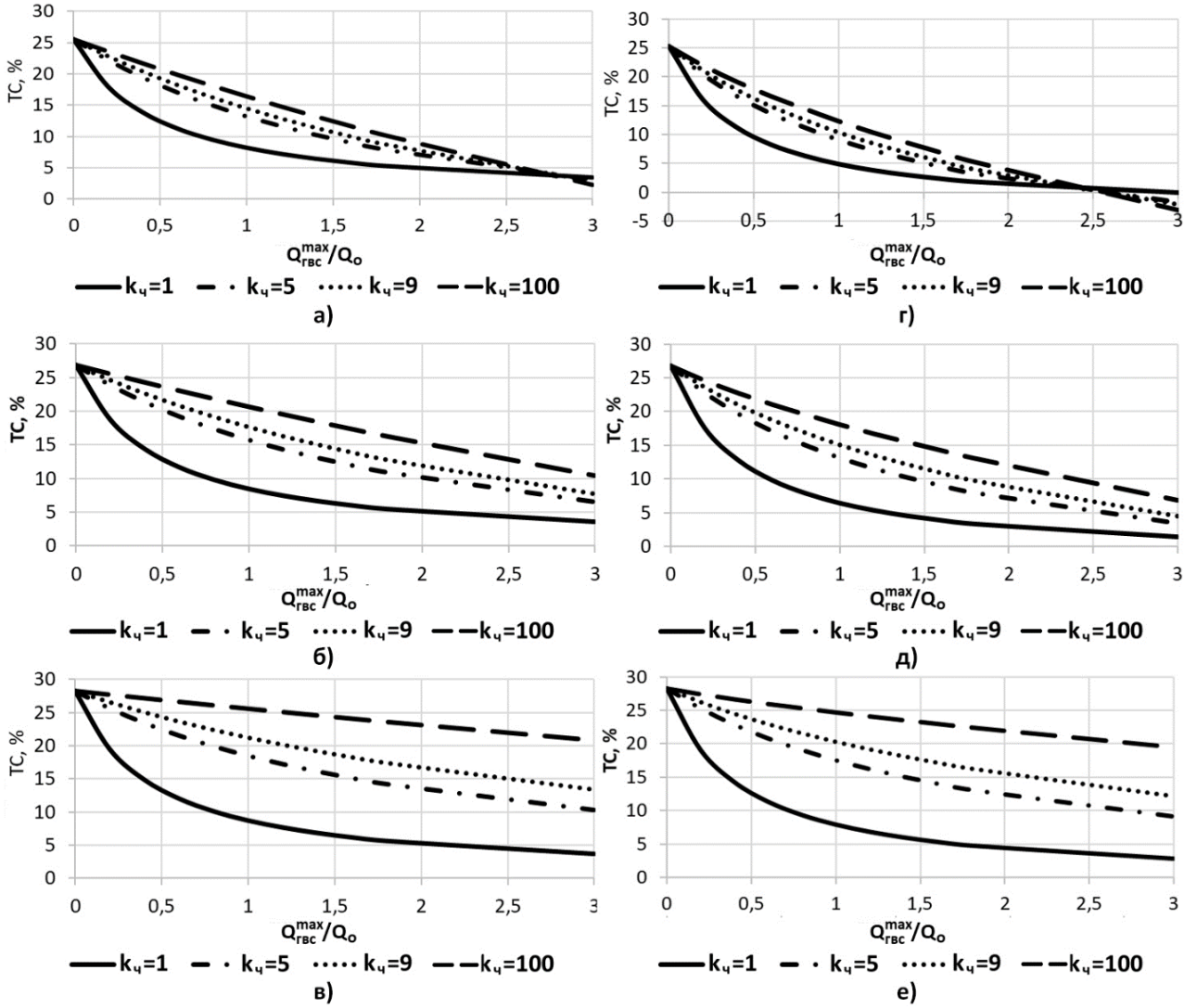


Рис. 2. Графики значений экономической эффективности при сравнении схемы с ТГР с классическими схемами с параллельным присоединением подогревателя ГВС (слева) и двухступенчатым смешанным присоединением подогревателя ГВС (справа) от изменения $Q_{гвс}^{max}/Q_o'$ и $\kappa_ч$, $k_т = 0{,}83$ (температурный график 95/70 °С): а, г – $\Delta H_{c1} = 50$ м вод.ст.; б, д – $\Delta H_{c1} = 30$ м вод.ст.; в, е – $\Delta H_{c1} = 10$ м вод.ст.

Например, значения $TC = f(Q_{гвс}^{max}/Q_o'; \kappa_ч)$ на рис. 3,б соответствуют теплосети с ΔH_{c1} = 10 м вод.ст. и $k_т$ = 0,97 (т. А), теплосети с ΔH_{c1} = 20 м вод.ст. и $k_т$ = 0,49 (т. В), а также теплосети с ΔH_{c1} = 30 м вод.ст. и $k_т$ = 0,35 (т. Г).

Проанализируем две одинаковые сети с расчетным значением ΔH_{c1} = 10 м вод.ст., но различным соотношением затрат на топливо и электроэнергию $k_т$ = 0,97 и $k_т$ = 0,83. Согласно рис. 3,б, ТС = 0 % при $Q_{гвс}^{max}/Q_o' = 2{,}0$ и $\kappa_ч$ = 100 (т. Д). Согласно рис. 1,в, ТС = 0 % уже при $Q_{гвс}^{max}/Q_o' = 2{,}4$ и $\kappa_ч$ = 100 (т. В).

Аналогично при сравнении с двухступенчатой смешанной схемой моделям 1, 2, 3 на рис. 3,д соответствуют модели $TC = f(Q_{гвс}^{max}/Q_o'; \kappa_ч)$ на рис. 3,е,ж,з. Схему с двухступенчатым смешанным присоединением подогревателя ГВС применяют при соотношениях $0{,}2 \le Q_{гвс}^{max}/Q_o' \le 1{,}0$. На рис. 3,д график *1* является граничной функцией расчетных значений ΔH_{c1} и $k_т$, при которых для всех соотношений $Q_{гвс}^{max}/Q_o' < 1{,}0$ эффективность от применения схемы с ТГР будет положительной независимо от изменения $\kappa_ч$, что показано на рис. 3,е.

На рис. 1,е показаны графики $TC = f(Q_{гвс}^{max}/Q_o'; \kappa_ч)$ при расчетных значениях $\Delta H_{c1} = 10$ м вод.ст. и $k_т = 0{,}83$, соответствующих т. Б на рис. 3,д. Так, например, для $Q_{гвс}^{max}/Q_o' = 1{,}0$ и $\kappa_ч = 5$ – *ТС* = 0 % (рис. 3,д), *ТС* = 1,4 % (рис. 1,е).

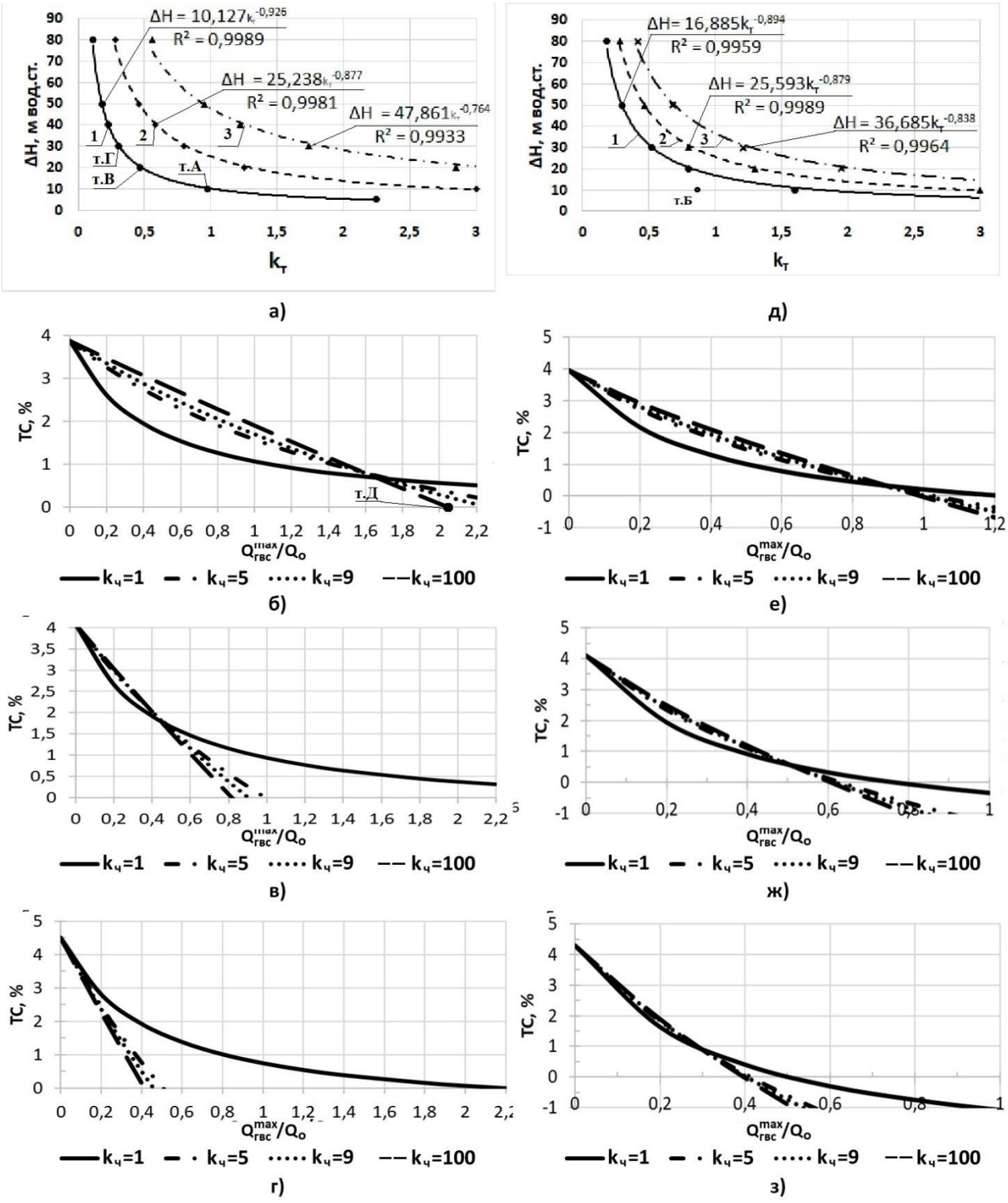


Рис. 3. Сравнение схемы с ТГР с параллельной (слева) и двухступенчатой смешанной (справа) схемами присоединения подогревателя ГВС (температурный график 150/70 °С): а – $\Delta H_{c1} = f(k_т)$ для параллельной схемы; б, в, г – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; к_ч)$, соответствующие графику *1*, *2* и *3* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 2{,}0$, $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}8$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}4$) соответственно; д – $\Delta H_{c1} = f(k_т)$ для двухступенчатой смешанной схемы; е, ж, з – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; к_ч)$, соответствующие графику *1*, *2* и *3* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 1{,}0$, $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}6$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}4$) соответственно

Результаты исследования температурного графика 95/70 °С. На рис. 4 представлены номограммы для определения экономической эффективности от внедрения ТГР в тепловом пункте при температурном графике 95/70 °С. Средняя ошибка аппроксимации моделей $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$ составляет не более 15 %.

На рис. 4,а график *1* является граничной функцией расчетных значений ΔH_{c1} и $k_т$, при которых для всех соотношений $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 2{,}0$ экономическая эффективность схемы с ТГР будет положительный. В частности, на рис. 4,б показаны значения $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$ при $\Delta H_{c1} = 80$ м вод.ст. и $k_т = 0{,}83$, а на рис. 2 представлено изменение $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$ при $k_т = 0{,}83$ и уменьшении расчетных потерь в сети ΔH_{c1}.

Установлено, что с уменьшением ΔH_{c1} экономическая эффективность увеличивается с увеличением $\kappa_ч$. Максимальное значение стандартного отклонения *TC* при ΔH_{c1} = 10 м вод.ст. составляет 6,40 % (при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' = 1{,}6$) по сравнению с двухступенчатой смешанной схемой и 4,60 % (при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' = 1{,}6$) по сравнению со схемой с параллельным присоединением подогревателя ГВС.

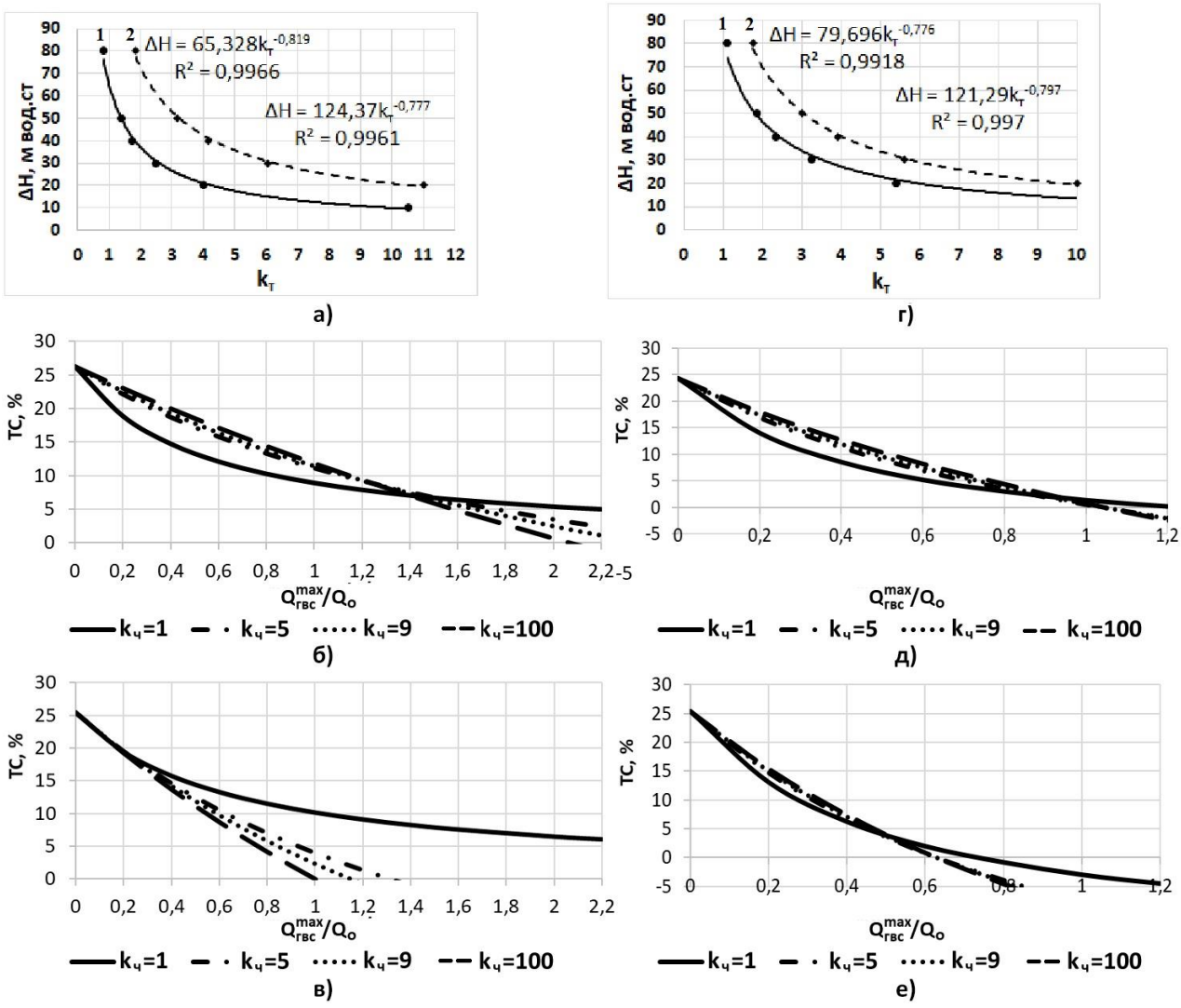


Рис. 4. Сравнение схемы с ТГР с параллельной (слева) и двухступенчатой смешанной (справа) схемами присоединения подогревателя ГВС (температурный график 95/70 °С): а – $\Delta H_{c1} = f(\kappa_т)$ для параллельной схемы; б, в – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$, соответствующие графику *1* и *2* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 2{,}0$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 1{,}0$) соответственно; г – $\Delta H_{c1} = f(k_т)$ для двухступенчатой смешанной схемы; д, е – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$, соответствующие графику *1* и *2* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 1{,}0$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}6$) соответственно

Анализ полученных данных (рис. 4) позволяет сделать следующий вывод: для условий эксплуатации тепловых сетей с потерями напора $\Delta H_{c1} \le 80$ м вод.ст. положительная экономическая эффективность от внедрения ТГР в тепловых пунктах будет возникать всегда. Максимальное значение *ТС* при стремлении $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}}$ к нулю составляет не более 25,0 % со стандартным отклонением 3,2 % по сравнению с параллельной и 4,2 % по сравнению с двухступенчатой смешанной схемой.

Результаты сравнения схемы с ТГР с АИТП (качественно-количественное регулирование). В данном случае схемы с ТГР и АИТП устраняют «перетоп». Минимальный располагаемый напор у абонента с АИТП практически на 15 м вод.ст. больше, чем с ТГР, но, с другой стороны, расход воды на отопление за счет количественного регулирования в период «излома» у абонента с АИТП меньше.

На рис. 5 и 6 представлены значения экономической эффективности от применения схемы с ТГР в тепловом пункте по сравнению с АИТП при отсутствии ГВС в тепловой сети $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температурный график отопительный). Анализ полученных данных показывает, что экономическая эффективность увеличивается с увеличением коэффициента $k_{\text{т}}$, т. е. с увеличением стоимости электрической энергии. При фиксированном значении коэффициента $k_{\text{т}}$ эффективность увеличивается с уменьшением расчетных потерь в сети ΔH_{c1}.

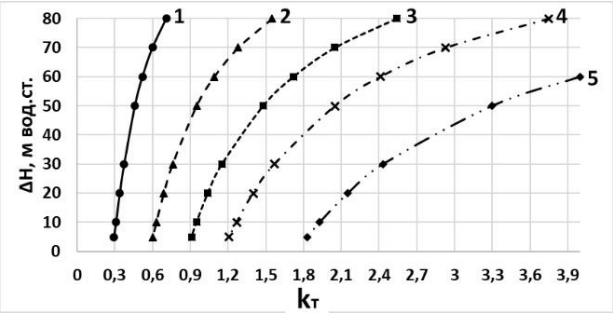


Рис. 5. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (качественно-количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температурный график 150/70 °С): 1 – *ТС* = 0,5 %; 2 – *ТС* = 1,0 %; 3 – *ТС* = 1,5 %; 4 – *ТС* = 2,0 %; 5 – *ТС* = 3,0 %

Для температурного режима 150/70 °С и $k_{\text{т}} = 1{,}2$ при ΔH_{c1} = 30–80 м вод.ст. эффективность будет составлять от 1,5 до 0,8 % (рис. 5). Для температурного режима 95/70 °С и $k_{\text{т}} = 1{,}2$ при $\Delta H_{c1} = 10$ м вод.ст. эффективность составит всего лишь около 0,5 % (рис. 6).

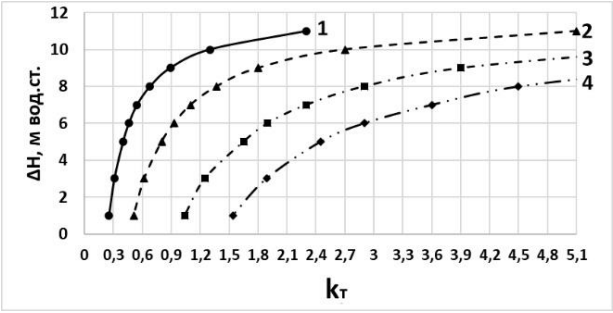


Рис. 6. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (качественно-количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температурный график 95/70 °С): 1 – *ТС* = 0,5 %; 2 – *ТС* = 1,0 %; 3 – *ТС* = 2,0 %; 4 – *ТС* = 3,0 %

Исследования показали, что при наличии в сети нагрузки ГВС значения *ТС* при расчетном ΔH_{c1} с увеличением соотношения $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}}$ будут уменьшаться. Это объясняется тем, что для схемы с ТГР производится работа сетевого насоса с наибольшими расходами воды (из-за максимального расхода сетевой воды на ГВС). В связи с этим годовые затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя оказываются больше, несмотря на то что $\Delta H_{\text{ист}}$ в формуле (2) практически на 15 м вод.ст. меньше, чем в схеме с АИТП.

Результаты сравнения схемы с ТГР с АИТП (количественное регулирование). При количественном регулировании в тепловой сети с АИТП на источнике теплоснабжения поддерживают постоянную температуру в подающем трубопроводе в течение всего отопительного периода, во внешней теплосети – количественное регулирование, в местной системе отопления – качественное регулирование.

На рис. 7 и 8 представлены значения экономической эффективности при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$.

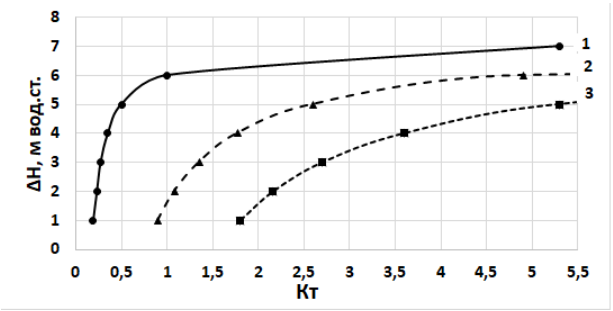


Рис. 7. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температура в тепловой сети 150 °С): 1 – *ТС* = 0,1 %; 2 – *ТС* = 0,5 %; 3 – *ТС* = 1,0 %

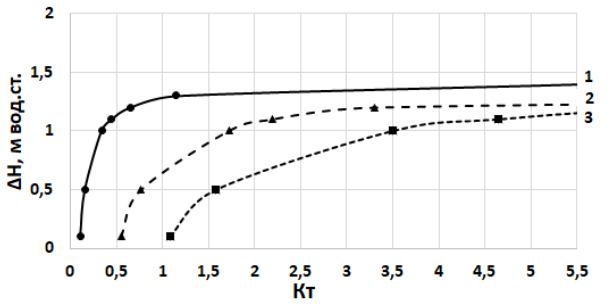


Рис. 8. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q_{\text{о}}' = 0{,}0$ (температура в тепловой сети 115 °С): 1 – *ТС* = 0,1 %; 2 – *ТС* = 0,5 %; 3 – *ТС* = 1,0 %

Выводы. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы об эффективности применения ТГР в тепловых пунктах.

1. Для температурного графика 150/70 °С с расчетными потерями в сети $\Delta H_{c1} \le 50$ м вод.ст. и коэффициентом $k_{\text{т}} \le 0{,}3$ экономическая эффективность составит не более $4{,}00 \pm 0{,}23$ %.

2. Для температурного графика 95/70 °С с расчетными потерями в сети $\Delta H_{c1} \le 50$ м вод.ст. и коэффициентом $k_{\text{т}} \le 2{,}0$ экономическая эффективность составит не более $25{,}00 \pm 4{,}20$ %.

3. С уменьшением расчетной температуры наружного воздуха температура точки «излома» температурного графика» уменьшается, следовательно, и эффективность будет возрастать.

4. С уменьшением соотношения $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q_{\text{о}}'$ эффективность увеличивается. При фиксированном соотношении $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q_{\text{о}}'$ эффективность будет увеличиваться при увеличении $\kappa_{ч}$ абонента. С уменьшением коэффициента $k_{\text{т}}$ экономическая эффективность будет увеличиваться.

Полученные данные [10] позволяют построить номограммы для определения экономической эффективности от применения ТГР в тепловом пункте для различных климатических условий и температурных графиков тепловой сети.

В целом тепловой пункт с ТГР эффективен в низконапорных и низкотемпературных системах централизованного теплоснабжения с потребителями, местные системы отопления которых не оборудованы регуляторами теплового потока.

По эффективности использования электрической энергии схема с ТГР уступает современным АИТП как в низко- и высоконапорных, так и в низко- и высокотемпературных системах теплоснабжения с качественно-количественным и количественным регулированием тепловой нагрузки. Экономическая эффективность от теплового пункта с ТГР с практической точки зрения незначителен или отсутствует.

Список литературы

1. **Сравнительный** анализ эффективности применения термогидравлического распределителя с классическими схемами присоединения абонентов / В.В. Смирнов, Ю.В. Яворовский, В.В. Сенников, Д.О. Романов // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 3. – С. 5 –13.

2. **Романов Д.О., Яворовский Ю.В., Смирнов В.В.** Экспериментальные исследования режимов работы термогидравлического распределителя // Надежность и безопасность энергетики. – 2019. – № 2. – С. 106–112.

3. **Экспериментальные** исследования и численное моделирование режимов работы термогидравлического распределителя / Д.О. Романов, Ю.В. Яворовский, В.В. Сенников, В.В. Смирнов // Энергосбережение – теория и практика. – 2018. – С. 233–237.

4. **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.

5. **Семенов В.Г., Барон В.Г., Разговоров А.С.** Индивидуальные тепловые пункты нового поколения // ЭНЕРГОСОВЕТ. – 2017. – № 48. – С. 15–18.

6. **Ильин Р.А., Столяров Д.В.** Комплексная модернизация тепловых пунктов в системах централизованного теплоснабжения // Символ науки. – 2015. – № 12-1. – С. 42–45.

7. **Савина Н.В., Артюшевская Е.Ю.** Управление теплоснабжением: современные индивидуальные тепловые пункты // Вестник АмГУ. – 2017. – № 79. – С. 55–59.

8. **Игнатек В.В., Боровков В.М.** Анализ методов регулирования отпусков тепловой энергии // Материаловедение. Энергетика. – 2010. – №2-2(100). – С. 65–71.

9. **Расчет** графиков регулирования тепловой нагрузки в независимых автоматизированных системах теплоснабжения / В.П. Черненков, И.Д. Лихачев, М.С. Барышев, М.Б. Рахматулина // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2017. – № 3(32). – С. 27–31.

10. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619037. Расчет технико-экономических показателей теплоснабжения при использовании ТГР в ТП: № 2019617713: заявл. 25.06.2019: опубл. 09.07.2019. / В.В. Смирнов, Ю.В. Яворовский, Д.Р. Залаев, Д.О. Романов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

References

1. Smirnov, V.V., Yavorovsky, Yu.V., Sennikov, V.V., Romanov, D.O. Sravnitel′nyy analiz effektivnosti primeneniya termogidravlicheskogo raspredelitelya s klassicheskimi skhemami prisoedineniya abonentov [Comparative analysis of the efficiency of using a thermohydraulic distributor versus classical consumer connection schemes]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 3, pp. 5–13.

2. Romanov, D.O., Yavorovskiy, Yu.V., Smirnov, V.V. Eksperimental′nye issledovaniya rezhimov raboty termogidravlicheskogo raspredelitelya [Experimental studies of

the operating modes of a thermohydraulic distributor]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2019, no. 2, pp. 106–112.

3. Romanov, D.O., Yavorovskiy, Yu.V., Sennikov, V.V., Smirnov, V.V. Eksperimental′nye issledovaniya i chislennoe modelirovanie rezhimov raboty termogidravlicheskogo raspredelitelya [Experimental studies and numerical modeling of the operating modes of a thermohydraulic distributor]. *Energosberezhenie: teoriya i praktika*, 2018, pp. 233–237.

4. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Sennikov, V.V. Eksperimental′noe podtverzhdenie lokalizatsii peremennykh gidravlicheskikh rezhimov v teplovykh punktakh s termogidravlicheskim raspredelitelem [Experimental confirmation of the localization of variable hydraulic regimes in heat substations equipped with a thermohydraulic distributor]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 5–14.

5. Semenov, V.G., Baron, V.G., Razgovorov, A.S. Individual′nye teplovye punkty novogo pokoleniya [New-generation individual heat substations]. *ENERGOSOVET*, 2017, no. 48, pp. 15–18.

6. Il′in, R.A., Stolyarov, D.V. Kompleksnaya modernizatsiya teplovykh punktov v sistemakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Comprehensive modernization of heat substations in district heating systems]. *Simvol nauki*, 2015, no. 12-1, pp. 42–45.

7. Savina, N.V., Artyushevskaya, E.Yu. Upravlenie teplosnabzheniem: sovremennye individual′nye teplovye punkty [Heat supply management: modern individual heat substations]. *Vestnik AmGU*, 2017, no. 79, pp. 55–59.

8. Ignatek, V.V., Borovkov, V.M. Analiz metodov regulirovaniya otpuskov teplovoy energii [Analysis of methods for regulating thermal energy supply]. *Materialovedenie. Energetika*, 2010, no. 2-2(100), pp. 65–71.

9. Chernenkov, V.P., Likhachev, I.D., Baryshev, M.S., Rakhmatulina, M.B. Raschet grafikov regulirovaniya teplovoy nagruzki v nezavisimykh avtomatizirovannykh sistemakh teplosnabzheniya [Calculation of thermal load regulation schedules in independent automated heat supply systems]. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU*, 2017, no. 3(32), pp. 27–31.

10. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Zalaev, D.R, Romanov, D.O. *Raschet tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley teplosnabzheniya pri ispol'zovanii TGR v TP* [Calculation of technical and economic indicators of heat supply using TGR in heat substations]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM v Rossii [Certificate of state registration of computer program in Russian Federation]. No. 2019619037, 2019.