



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Куницкий В.А., Лукин С.В.

ФГБОУ ВО Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия
globee@mail.ru

Резюме: Авторами исследуется потенциальный энергетический, экономический и экологический эффект от использования локальной утилизации теплоты стоков, образующихся в душевых. **АКТУАЛЬНОСТЬ.** На данный момент в России практически все хозяйственно-бытовые сточные воды удаляются в канализационные сети без полезного использования теплоты, которой они обладают. Важно определить эффект от реализации такого способа утилизации теплоты, выявить и проанализировать проблемы, мешающие это сделать. **ЦЕЛЬ.** Цель работы заключается в определении потенциального эффекта от использования локальной утилизации теплоты стоков, образующихся в душевых. **МЕТОДЫ.** На основе верифицированной математической модели теплообменника определяется энергетический эффект от отдельного использования душевой. К структуре теплопотребления отдельного здания применяется ряд допущений и на основе имеющихся данных о среднегодовом теплопотреблении жилых зданий в г. Москве рассчитывается экономический и экологический эффект от энергосберегающего мероприятия. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Относительная экономия в рамках годового теплопотребления здания с децентрализованной и централизованной системой горячего водоснабжения (ГВС) составила 5,3 % и 3,1 % соответственно (64 и 37 Гкал). Экономия топлива составила: 9145 тонн условного топлива (т.у.т.) и 5227 т.у.т для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС соответственно (14,5 и 8,5 тыс. тонн CO₂-эквивалента). Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия для случая с децентрализованной системой ГВС на основе проточного электрического водонагревателя составил 1,5 года. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Локальная утилизация теплоты стоков дает возможность получить существенный энергетический и экологический эффект в рамках любого населенного пункта, но на данный момент отсутствуют меры поддержки потребителей, реализующих энергосберегающие мероприятия. В настоящее время подобный способ утилизации теплоты интересен только тем потребителям, у которых источником тепловой энергии для нужд ГВС является электричество.

Ключевые слова: утилизационный теплообменник для сточных вод; утилизация теплоты воды; энергоэффективность систем ГВС; экспериментальное испытание теплообменного аппарата.

Благодарности: Авторы благодарны Департаменту экономического развития Вологодской области за поддержку и содействие развитию научно-исследовательской деятельности в регионе.

Для цитирования: Куницкий В.А., Лукин С.В. Определение эффективности локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 136-149. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-136-149.

DETERMINING THE EFFICIENCY OF LOCAL HEAT RECYCLING WASTEWATER BASED ON A HEAT EXCHANGER

Kunitskiy V.A., Lukin S.V.

Vologda State University, Vologda, Russia
globee@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The authors research the potential energy, economic and environmental effects of using local heat recovery from wastewater generated in showers. At the moment in Russia, almost all household wastewater is disposed of in sewer networks without the beneficial use of the heat that they possess. It is important to determine the effect of implementing this method of heat recovery, to identify and analyze the problems that prevent this from being done. *THE PURPOSE.* The purpose of the work is to determine the potential effect of using local heat recovery from wastewater generated in showers. *METHODS.* Based on a verified mathematical model of the heat exchanger, the energy effect from the individual use of the shower room is determined. A number of assumptions are applied to the heat consumption structure of an individual building and, based on available data on the average annual heat consumption of residential buildings in Moscow, the economic and environmental effect of energy-saving measures is calculated. *RESULTS.* Relative savings within the annual heat consumption of a building with a decentralized and centralized hot water supply system were 5,3% and 3,1%, respectively (64 and 37 GCal). Fuel economy amounted to: 9145 toe and 5227 toe for a building with a decentralized and centralized hot water supply system, respectively (14,5 and 8,5 thousand tons of CO₂-eq). The payback period for energy-saving measures for the case of a decentralized hot water system based on an instantaneous electric water heater was 1,5 years. *CONCLUSION.* Local waste heat recovery makes it possible to obtain a significant energy and environmental effect within any locality, but at the moment there are no measures to support consumers implementing energy-saving measures. Currently, this method of heat recovery is of interest only to those consumers whose source of thermal energy for the needs of hot water supply is electricity.

Keywords: utilization heat exchanger for wastewater; utilization of water heat; energy efficiency of hot water systems; experimental testing of a heat exchanger.

Acknowledgment: The authors are grateful to the Department of Economic Development of the Vologda region for supporting and promoting the development of scientific research activities in the region.

For citation: Kunitskiy V.A., Lukin S.V. Determining the efficiency of local heat recycling wastewater based on a heat exchanger. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (4): 136-149. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-136-149.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день в России практически все хозяйственно-бытовые сточные воды удаляются в канализационные сети без предварительного отбора тепловой энергии, которой они обладают [1]. Исследование данной проблемы и поиск путей её решения согласуется с политикой рационального использования ресурсов, реализуемой, в частности, в топливно-энергетическом комплексе нашей страны.

Авторами исследуется способ утилизации теплоты сточных вод, образующихся в душевых, на основе утилизационного теплообменного аппарата. Теплообменник при этом располагается в непосредственной близости к месту образования стоков (водоразборному устройству), что позволяет практически полностью избежать тепловых потерь при транспортировке стоков до места рекуперации тепловой энергии. На основе данного способа осуществляется предварительный нагрев холодной воды, планируемой к использованию в душевой, при помощи отбора теплоты у удаляемой горячей воды. Такое устройство работает только во время использования душа и позволяет получить существенный энергетический эффект как в сетях с индивидуальным горячим водоснабжением, так и с централизованным. В первом случае энергетический эффект выражается в снижении необходимого количества теплоты для нагрева холодной воды в водонагревателе, а во втором случае выражается в виде уменьшения доли горячей воды, необходимой для получения единицы воды требуемой (комфортной) температуры [2].

Подобные устройства распространены на рынках развитых стран и стран с высокой ценой на энергоресурсы. Изображение утилизационного теплообменного аппарата (ТОА) в общем виде представлено на рисунке 1.

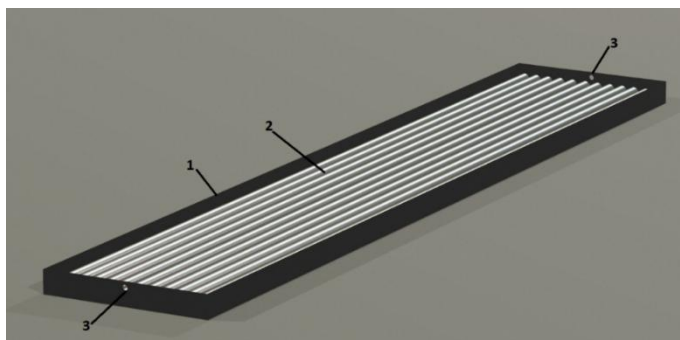


Рис. 1. Схематичное изображение теплообменного устройства, где 1 – корпус ТОА; 2 – стальные трубы с холодной водой (нагреваемой средой); 3 – отверстия для подачи воды в корпус ТОА (удаления из корпуса)

Fig. 1. Model of the heat exchange device: 1 – heat exchanger housing; 2 – a tube with heated water; 3 – opening for supply/removal of the heating medium from the heat exchanger housing

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Анализируя опыт развития топливно-энергетических комплексов других стран, можно предположить, что с ростом технического, экономического и социального уровня развития появляется необходимость более эффективного использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Рациональным путем для России представляется использование уже существующего мирового опыта в области использования ВЭР и ведение работы по решению потенциальных задач уже сейчас.

На данный момент авторами разработано техническое решение рекуперативного теплообменного аппарата для локальной утилизации теплоты сточных вод [3], разработана и верифицирована экспериментом математическая модель теплопередачи в данном устройстве [4], определены условия работы, влияющие на эффективность утилизации тепловой энергии стоков, рассчитаны капитальные затраты и определено необходимое количество приемов душа для того, чтобы окупить энергосберегающее мероприятие [5].

Для качественной оценки потенциального эффекта от энергосберегающего мероприятия необходимо учитывать то, что существенную часть времени устройство работает при нестационарном тепловом режиме. При этом создание теплообменника с унифицированными идеальными параметрами, подходящими для любого водоразборного устройства, вероятно, невозможно, так как условия и режим работы каждой душевой уникальны. В каждом конкретном случае приходится подбирать конфигурацию теплообменника для имеющихся условий, с оптимальными параметрами устройства [2].

Данная статья посвящена определению потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта от использования локальной утилизации теплоты сточных вод, образующихся в душевых, в рамках отдельного жилого здания в России.

Литературный обзор (Literature Review)

В работах отечественных ученых, занимающихся проблемой утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод, данная проблема рассмотрена подробно и обстоятельно. В том числе качественно рассмотрен вопрос потенциального эффекта от использования данных стоков, как источника энергии. Оценка теплового потенциала хозяйственно-бытовых сточных вод, доступного для полезного использования, на примере конкретного населенного пункта представлена в публикации Бежана А.В. [6]. В исследовании Кологривых А.С. и Семенов А.С. приводятся данные об объеме образующихся сточных вод в разных федеральных округах нашей страны, температуре стоков в разных местах канализационной сети (в месте образования, в выпусках многоквартирных домов, канализационно-насосных станциях, водоочистных сооружениях), определяется энергосодержание потока сточных вод, образующихся от отдельного многоквартирного дома [7]. В работе Андрианова А.П. и Грибкова А.Н. определяется средняя температура сточных вод, поступающих на очистные сооружения, и определяется потенциальный энергетический эффект от использования данных стоков на станциях с тепловыми насосными установками в качестве источника низкопотенциальной теплоты [8]. В работе коллектива авторов Васильева Г.П., Дмитриева А.Н., Абуева И.М. и Юрченко И.А. сделан вывод, что в г. Москве при широком внедрении утилизации теплоты сточных вод есть возможность ежегодно экономить более 250 млн. м³ природного газа [9]. В работе коллектива авторов Юсупова Р.Д., Зиганшина Ш.Г., Политовой Т.О. и Базуковой Э.Р.

рассматривается способ обеспечения нужд горячего водоснабжения путём использования солнечной энергии и приводится расчет необходимого количества теплоты для реализации данного мероприятия [10].

В работах зарубежных авторов также подробно исследуется проблема полезного использования теплоты сточных вод. В публикациях коллектива авторов Sadegh Shahmohammadi, Zoran Steinmann, Henry King, Hilde Hendrickx и Mark A.J. Huijbregts приводятся данные о средней длительности использования душевой, количестве использований душевой за расчетный период, массовом расходе воды в душевой и на основе представленных данных определяется доступное количество теплоты при утилизации хозяйственно-бытовых стоков [11]. Коллектив авторов Meireles I., Sousa V., Bleys B. и Poncelet B. в своём исследовании приводят данные о количестве сточных вод, генерируемых среднестатистическим домохозяйством [12]. В публикации ученых Amanda N. Binks, Steven J. Kenway и Paul A. Lant определяется необходимое количество энергии для обеспечения отдельного домохозяйства горячим водоснабжением и предлагается способ управления данным параметром [13]. В публикации исследователей Vitor Sousa, Cristina Matos Silva и Ines Meireles приводятся данные об энергетическом эффекте, полученном после реализации комплекса энергосберегающих мероприятий (в том числе и повторного использования теплоты сточных вод) в системе водоснабжения общественного здания [14]. Коллектив авторов Skai Edwards, Ian Beausoleil-Morrison и Andre Laperriere представил результаты работы по определению закономерностей в использовании сетей горячего водоснабжения среднестатистическим домохозяйством с целью расчета суммарного энергетического потенциала образующихся стоков, доступного для полезного использования [15]. Коллектив авторов Merida Garcia A., Rodriguez Diaz J.A., Garcia Morillo J. и McNabola A. в своей работе представляют данные о потенциальном энергетическом и экономическом эффекте от рекуперации сточных вод в Испании [16]. Исследователи Djordje Mitrovic, Miguel Crespo Chacon, Aida Merida Garcia, Jorge Garcia Morillo, Juan Antonio Rodriguez Diaz, Helena M. Ramos, Kemi Adeyeye, Armando Carravetta и Aonghus McNabola представили результаты межстрановой оценки потенциального эффекта от рекуперации хозяйственно-бытовых сточных вод: на основе данных, собранных в Ирландии, Северной Ирландии, Шотландии, Уэльсе, Испании и Португалии, определена возможность уменьшения необходимого количества энергии для работы сетей горячего водоснабжения на 6-13 % [17]. Ученые Ziwen Liu, Qingxu Huang, Chunyang He и Changbo Wang в научной публикации представляют результаты работы по определению энергопотребления объектов из различных отраслей промышленности в городской агломерации [18]. Коллектив авторов Pomianowski M.Z., Johra H., Marszal-Pomianowska A. и Zhang C. анализирует энергетический эффект от использования инновационных способов производства горячей воды, её распределения и циркуляции [19].

Данная публикация подготовлена в рамках работы над диссертацией на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки). В рамках научно-исследовательской работы решается комплекс задач: разработка математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменнике и её верификация на основе экспериментального испытания (физической модели); исследование влияния изменения геометрических и режимных параметров теплообменного аппарата на эффективность утилизации тепловой энергии сточных вод; оценка эффективности и технико-экономическая оценка применения утилизационного ТОА в рамках системы горячего водоснабжения отдельного здания; разработка на основе полученных результатов исследования инженерной методики проектирования теплообменного устройства для утилизации теплоты сточных вод.

Целью научно-исследовательской работы (диссертации) является решение комплексных задач повышения эффективности систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты сточных вод, оценка энергетической эффективности от применения утилизационного теплообменного аппарата в сетях ГВС; проведение теоретических и экспериментальных исследований для разработки методики проектирования утилизационных теплообменных аппаратов с оптимальными характеристиками для конкретных условий эксплуатации.

Научная значимость исследования состоит в разработанной верифицированной математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате; получении закономерностей, описывающих влияние геометрических, теплофизических и режимных параметров ТОА на количество полезно утилизированной тепловой энергии отдельным теплообменным устройством; получении данных о количестве тепловой энергии в системе горячего водоснабжения конкретного объекта теплоснабжения, доступной для

полезного использования путём утилизации теплоты сточных вод на основе утилизационных теплообменных аппаратов.

Теоретическая значимость заключается в разработке и обосновании расчетно-экспериментальной методики на базе использования разработанной математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате; оценке потенциального эффекта от внедрения локальной утилизации теплоты сточных вод на конкретном объекте теплоснабжения.

Практическая значимость исследования состоит в разработке программного обеспечения для автоматического расчета энергетического, экономического и экологического эффекта при утилизации стоков в душевых жилого здания и формулировании рекомендаций для совершенствования систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты стоков.

В рамках данной статьи описывается результат, полученный при определении эффективности утилизации тепловой энергии сточных вод: потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта, доступного при интеграции утилизационного ТОА в сети ГВС в рамках конкретного объекта теплоснабжения.

Целью данной публикации является определение потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта от использования локальной утилизации теплоты сточных вод, отводимых от душевых, в рамках отдельного жилого здания в России.

Научная значимость данной публикации состоит в расчете потенциального эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата (энергетический, экономический и экологический эффект) при конкретных условиях эксплуатации объекта теплоснабжения. **Теоретическая значимость** данной публикации состоит в расчете потенциального эффекта от использования утилизационных ТОА для отбора теплоты сточных вод и анализе факторов, влияющих на распространенность данного способа рекуперации теплоты сточных вод в топливно-энергетическом комплексе России.

Практическая значимость данной публикации состоит в представленном алгоритме расчета эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод, который планируется использовать при создании программного обеспечения для автоматического расчета потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта от реализации энергосберегающего мероприятия на конкретном объекте теплоснабжения.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе используются следующие методы научного исследования: математическое моделирование теплопередачи в утилизационном ТОА с заданными параметрами и при расчетных условиях работы; абстрагирование (упрощение реальной структуры теплоснабжения отдельным жилым зданием в течение года и использование допущений в отношении данных о работе душевых); анализ и сравнение полученных расчетным путем значений потенциального эффекта от энергосберегающего мероприятия.

На основе математического моделирования исследуется процесс теплопередачи в ТОА при разных условиях эксплуатации. Результатом расчета является распределение температуры (функция температуры $T_2(x;t)$) внутри нагреваемого потока воды в пространстве и времени (рис. 2 и рис. 3). На основе полученных данных о температуре нагреваемой воды на выходе из ТОА определяется количество полезно утилизированной тепловой энергии, отобранной от сточных вод. Далее, данный энергетический эффект экстраполируется на теплоснабжение всех душевых в жилом здании.

Достоверная информация о среднем теплоснабжении жилого здания в разных климатических зонах России отсутствует. Для расчета брались данные из открытых источников:

- о среднем теплоснабжении жилых зданий, построенных по типовым проектам, в городе Москве (в расчете на один 1 м^2 полезной площади) [20];
- о доле тепловой энергии, расходуемой на нужды ГВС, относительно всего теплоснабжения жилого здания.

Также, из опубликованных работ были взяты данные о среднем массовом расходе, при котором используются водоразборные устройства в душевых, и длительности отдельного использования душевой [11].

Данные, используемые для математического моделирования, представлены в таблице 1.

Параметры для расчета
Parameters for calculation

Параметр	Расчетное значение параметра
Длина труб в ТОА, м	2
Количество труб, шт	10
Диаметр трубы, $d_{вн}/d_{нн}$, м	0,021 / 0,024
Габариты корпуса ТОА (длина, ширина, высота), м	2 / 0,3 / 0,15
Расчетная площадь поверхности теплообмена, m^2	1,15
Массовый расход греющей и нагреваемой среды, G, кг/с	0,14
Температура нагреваемой среды на входе в ТОА, $t_x, ^\circ C$	5; 15
Температура греющей среды (сточной воды) на входе в ТОА, $t_r, ^\circ C$	40
Температура потоков сред в начальный момент времени $T(x,0)$	20
Длительность отдельного использования душевой, τ_0 , с	420
Среднее значение удельного потребления тепловой энергии на 1 m^2 полезной площади в жилом здании, w, Гкал/ m^2	0,214
Длительность периода с температурой холодной воды на входе в ТОА $t_x = 5 ^\circ C$ в течение года, месяц	6
Длительность периода с температурой холодной воды на входе в ТОА $t_x = 15 ^\circ C$ в течение года, месяц	6
Количество тепловой энергии, расходуемое на нужды ГВС, от общего теплопотребления здания за год, %	25

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Результаты (Results)

Энергетический эффект. На рисунке 2 и рисунке 3 представлены распределения температуры внутри потока нагреваемой среды при значениях температуры $t_x=5 ^\circ C$ и $t_x=15 ^\circ C$ на входе в ТОА в разные моменты времени после включения теплообменника (после начала работы душевой), полученные на основе верифицированной математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате [4]. Температура холодной воды в летний и зимний сезон разная, а греющая вода в течение года имеет постоянную температуру $t_r = 40 ^\circ C$. Из-за этого энергетический эффект от утилизации сточных вод будет зависеть от времени года и это также необходимо учитывать.

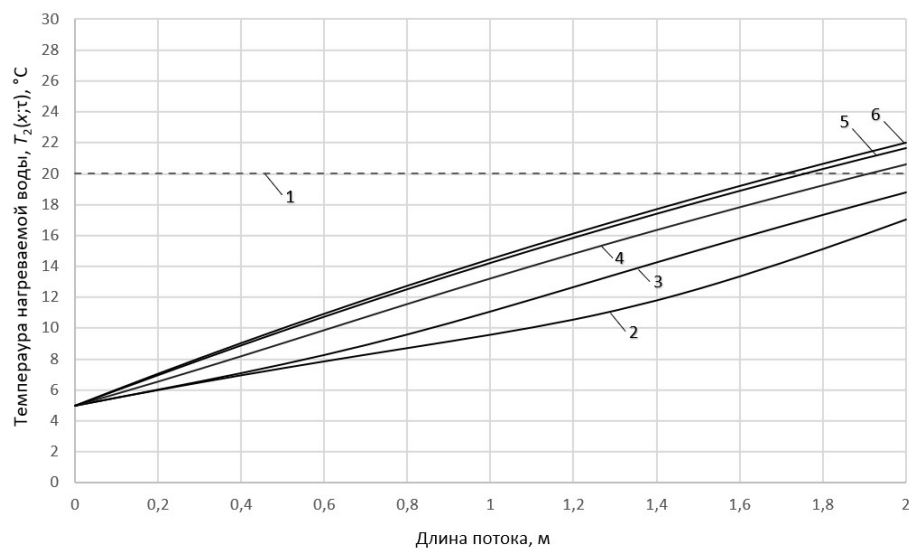


Рис. 2. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТОА, где 1 – $\tau = 0$ с; 2 – $\tau = 60$ с; 3 – $\tau = 120$ с; 4 – $\tau = 180$ с; 5 – $\tau = 240$ с; 6 – $\tau = 300$ с

Fig. 2. Temperature distribution inside the flow of the heated flow water at different times after the start of the heat exchange device operation, where 1 – $\tau = 0$ s; 2 – $\tau = 60$ s; 3 – $\tau = 120$ s; 4 – $\tau = 180$ s; 5 – $\tau = 240$ s; 6 – $\tau = 300$ s

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

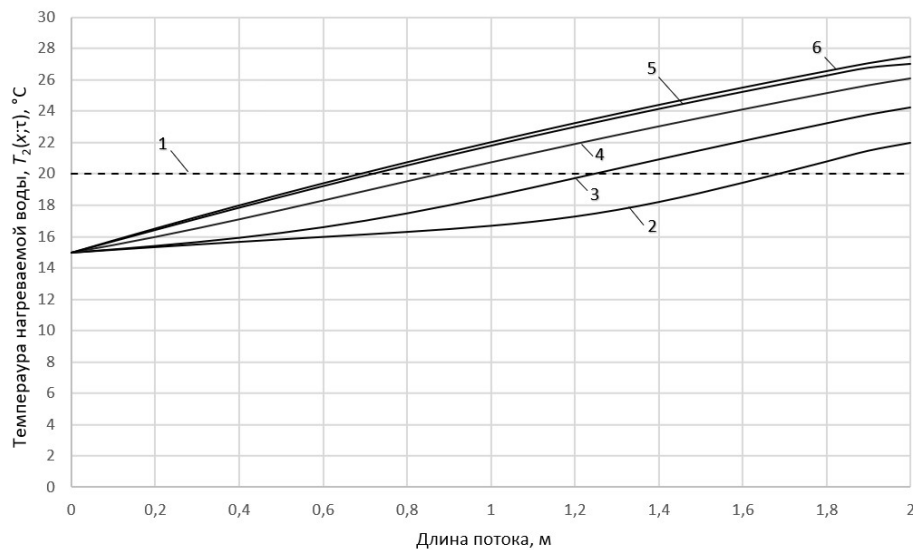


Рис. 3. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТОО, где 1 – $\tau = 0$ с; 2 – $\tau = 60$ с; 3 – $\tau = 120$ с; 4 – $\tau = 180$ с; 5 – $\tau = 240$ с; 6 – $\tau = 300$ с

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Из графиков на рисунке 2 и рисунке 3 видно, что теплообменник с заданными характеристиками достигает условно стационарного теплового режима работы в интервале от 180 до 240 секунд после включения (после начала работы душевой).

При децентрализованной системе ГВС общее количество тепловой энергии, необходимое для работы душевой в течение 7 минут, определяется по формуле:

$$Q = G \cdot \tau_0 \cdot c_p \cdot (t_z - t_x), \quad (1)$$

где G – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с; c_p – теплоемкость воды Дж/(кг·К); $t_z = 40$ – температура нагреваемой воды (на выходе из водонагревателя), °C; t_x – температура нагреваемой воды на входе в водонагреватель, °C; $\tau_0 = 7 \cdot 60 = 420$ – длительность отдельного использования душа, с; c_p – теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

На основе полученных данных о температуре нагреваемой воды на выходе из ТОО во времени (рис. 2 и рис. 3) определяется мощность теплообменного аппарата в каждый момент времени τ по формуле:

$$Q(\tau) = G \cdot c_p (T_2''(\tau) - t_x), \quad (2)$$

где G – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с; c_p – теплоемкость воды Дж/(кг·К); $T_2''(\tau)$ – температура нагреваемой воды на выходе из теплообменного аппарата в момент времени τ , °C; t_x – температура нагреваемой воды на входе в теплообменный аппарат, °C.

При длительности использования душевой τ_0 количество полезно утилизированной теплоты, идущей на нагрев холодной воды, определяется на основе значения мощности ТОО в каждый момент времени его работы (2) согласно выражению:

$$\Delta Q = \int_0^{\tau_0} Q(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $Q(\tau)$ – мощность ТОО в момент времени τ , Вт; τ_0 – длительность отдельного использования душевой, с.

Средняя мощность ТОО во время использования душевой определяется по выражению $\bar{Q} = (\Delta Q / \tau_0)$, Вт.

Относительное снижение требуемой тепловой энергии для разового приема душа при использовании теплообменного аппарата определяется согласно выражению: $\varphi = (\Delta Q / Q) \cdot 100\%$.

Относительная экономия в таком случае в зимний период составит $\varphi = 44,8\%$, а в летний $\varphi = 41,8\%$. Но в абсолютных значениях экономия теплоты за отдельное использование душевой в зимний период составит 3877 кДж, а в летний 2521 кДж. Так как длительность летнего и зимнего периода в представленном расчете одинаковы, то

вычислим общее относительное снижение необходимой тепловой энергии за весь год, как среднее арифметическое между экономией в зимний и летний период, то есть $\varphi' \approx 43\%$.

При централизованной системе ГВС в зимний период для получения 1 м^3 воды комфортной температуры $t_r = 40^\circ\text{C}$ необходимо $0,64 \text{ м}^3$ горячей воды (с температурой 60°C) и $0,36 \text{ м}^3$ холодной воды (с температурой 5°C), а в летний период $0,56 \text{ м}^3$ горячей воды и $0,44 \text{ м}^3$ холодной воды.

В централизованной системе ГВС при использовании локальной утилизации теплоты стоков от душевых в зимний период необходимое количество горячей воды снизится до $0,49 \text{ м}^3$, а в летний период снизится до $0,42 \text{ м}^3$. Относительное снижение необходимой горячей воды составляет в обоих случаях $\varphi'' \approx 25\%$.

Согласно имеющимся данным среднее значение удельного потребления тепловой энергии на 1 м^2 полезной площади в жилом здании составляет $0,214 \text{ Гкал/м}^2$. Принято считать, что на нужды ГВС приходится 25% от общего теплопотребления. Допустим, что на использование душа приходится половина от всей нагрузки на ГВС в жилом здании, то есть $Q_{\text{душ}} = 12,5\%$ от общего теплопотребления.

Используя имеющиеся данные, определим количество теплоты, доступное к полезному использованию при локальной утилизации стоков от душевых в жилом здании с децентрализованной системой ГВС. Для расчета возьмем жилое здание, в котором находится $N=100$ квартир со средней площадью каждой $f=55 \text{ м}^2$. Среднегодовое теплопотребление такого объекта составит:

$$W = w \cdot f \cdot N, \quad (4)$$

где w – среднее значение удельного потребления тепловой энергии на 1 м^2 полезной площади в жилом здании, $w, \text{ Гкал/м}^2$; f – средняя расчетная площадь квартиры, м^2 ; N – расчетное количество квартир в жилом здании, шт;

Энергетический эффект от локальной утилизации стоков от душевых в жилом здании с децентрализованной системой ГВС составит:

$$E' = W \cdot Q_{\text{душ}} \cdot \varphi', \quad (5)$$

где W – расчетное среднегодовое теплопотребление жилого здания, Гкал ; $\varphi' \approx 43\%$ – относительное снижение необходимого количества тепловой энергии на нагрев воды для душа при децентрализованной системе ГВС, %; $Q_{\text{душ}} = 12,5\%$ – доля тепловой энергии, расходуемая на использование душевых, в рамках всего теплопотребления жилого здания, %.

В соответствии с представленным расчетом абсолютная экономия тепловой энергии в год составит $E' = 64 \text{ Гкал}$, а относительное снижение необходимой тепловой энергии в рамках общего теплопотребления здания составит $0,43 \cdot 12,5\% = 5,4\%$.

При централизованном ГВС локальная утилизация теплоты стоков позволяет уменьшить на 25% количество необходимой горячей воды и, соответственно, получить такой же размер экономии тепловой энергии.

Энергетический эффект от локальной утилизации стоков в жилом здании с централизованной системой ГВС определяется согласно выражению:

$$E'' = W \cdot \varphi'' \cdot Q_{\text{душ}}, \quad (6)$$

где W – расчетное среднегодовое теплопотребление жилого здания, Гкал ; $\varphi'' \approx 25\%$ – относительное снижение необходимого количества тепловой энергии на нагрев воды для душа при централизованной системе ГВС, %; $Q_{\text{душ}} = 12,5\%$ – доля тепловой энергии, расходуемая на использование душевых, в рамках всего теплопотребления жилого здания, %.

При централизованной системе ГВС абсолютная экономия тепловой энергии в год составит $E'' = 37 \text{ Гкал}$, а относительное снижение тепловой энергии в рамках общего теплопотребления здания составит $0,25 \cdot 12,5\% = 3,1\%$.

Экономический эффект. Выгодополучателем при использовании локальной утилизации теплоты сточных вод является отдельное домохозяйство. Экономический эффект в данном случае выражается через экономию денежных средств, расходуемых на оплату тепловой энергии для нагрева воды. Для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС экономия денежных средств составит $\varphi' \approx 43\%$ и $\varphi'' \approx 25\%$ соответственно.

Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия предлагается в данном конкретном случае определять не через время, а через количество отдельных использований душевой с заданными параметрами.

Капитальные затраты на реализацию энергосберегающего мероприятия определяются по формуле:

$$c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4, \quad (7)$$

где k_1 – стоимость материалов для создания ТОА, руб.; k_2 – стоимость монтажных работ по сборке и установке утилизационного ТОА, руб.; k_3 – стоимость транспортных услуг, руб.; k_4 – стоимость пуско-наладочных работ, руб.

Количество приемов душа, необходимое для того, чтобы окупить капитальные затраты на энергосберегающее мероприятие, определено по формуле:

$$n = \frac{c}{Q \cdot \varphi \cdot m}, \quad (8)$$

где Q – количество тепловой энергии, необходимое для нагрева воды в рамках разового использования душа, Дж; где φ – относительная экономия тепловой энергии, %; c – капитальные затраты на энергосберегающее мероприятие, руб; m – стоимость 1 Дж тепловой или электрической энергии, руб/Дж.

Рассмотрим количество использований душевой, необходимое для окупаемости энергосберегающего мероприятия при трех разных способах обеспечения горячего водоснабжения в многоквартирном жилом здании:

- децентрализованная система ГВС с газовым проточным водонагревателем;
- децентрализованная система ГВС с электрическим проточным водонагревателем;
- централизованная система ГВС.

Согласно формуле (1), среднее количество тепловой энергии в течение года для отдельного использования душевой составляет 7408 кДж. Стоимость отдельного использования душевой при использовании газового водонагревателя составляет 1,55 руб. (при тарифе на природный газ 6,31 руб/м³); при использовании электрического водонагревателя стоимость использования душевой составляет 10 руб. (при тарифе 5 руб/кВт·ч); при централизованном обеспечении ГВС стоимость использования душевой составила 4,58 руб (при тарифе на горячее водоснабжение 130 руб/м³).

Рассмотрим срок окупаемости при разной конфигурации теплообменника (при разном количестве трубок с нагреваемой средой). От данного параметра зависит энергетическая эффективность работы устройства и, следовательно, относительная экономия тепловой энергии φ .

Результаты расчета по формуле (8) для разного количества используемых трубок в ТОА представлены на рисунке 4.

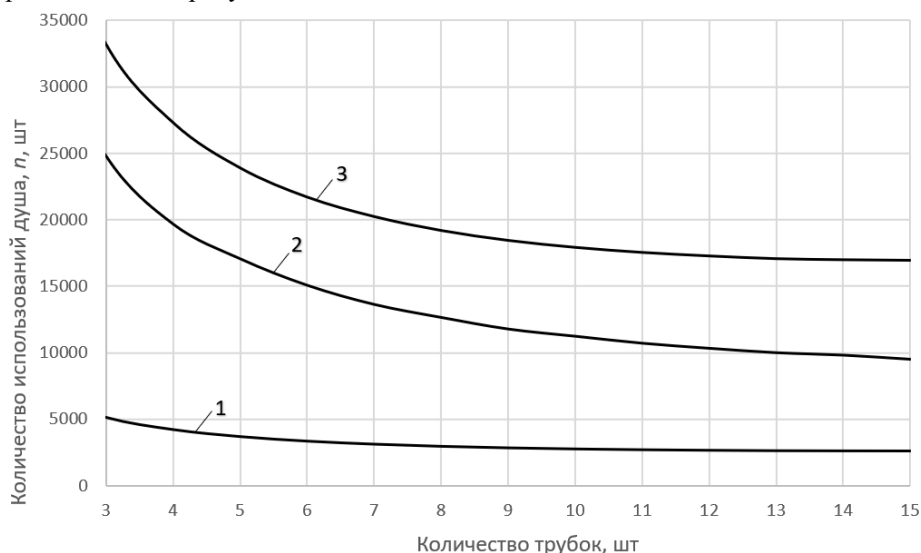


Рис. 4. Количество приемов душа, необходимое для того, чтобы окупить капитальные затраты на реализацию энергосберегающего мероприятия, где 1 – график, полученный для децентрализованной системы ГВС с проточным электрическим водонагревателем; 2 – график, полученный для централизованной системы ГВС; 3 – график, полученный для децентрализованной системой ГВС с проточным газовым водонагревателем

Fig. 4. The number of showers required to recoup the capital costs of implementing an energy-saving measure, where 1 – graph obtained for a decentralized hot water system with a flow-through electric water heater; 2 – graph obtained for a centralized hot water supply system; 3 – graph obtained for a decentralized hot water system with a flow-through gas water heater

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Экологический эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод, отводимых от душевых устройств, в жилом доме также предлагается рассчитать на основе использованного ранее примера – здание с количеством квартир $N=100$, со средней площадью каждой квартиры $f=55 \text{ м}^2$ и заданной конфигурацией теплообменного аппарата (параметры для расчета, представленные в таблице). Среднегодовое теплотребление такого объекта, согласно формуле (4), составит $W = 1177 \text{ Гкал}$. А экономия теплоты в абсолютных величинах составила: для децентрализованной системы ГВС $E' = 64 \text{ Гкал}$, а для централизованной $E'' = 37 \text{ Гкал}$.

При пересчете сэкономленного количества теплоты в тонны условного топлива определяется экономия: в здании с децентрализованной системой ГВС сэкономлено 9145 т.у.т., а в здании с централизованной системой ГВС 5287 т.у.т.

Данное количество тонн условного топлива (9145 и 5287) соответствует примерно такому же количеству каменного угля, а также соответствует объёму природного газа в размере 7925 тыс. м^3 и 4581 тыс. м^3 .

Определим значение CO_2 -эквивалента для полученных значений сэкономленного топлива. При переводном коэффициенте 2,76 для каменного угля количество CO_2 -эквивалента составит 25,2 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 14,6 тыс. тонн для здания с централизованной системой ГВС. При переводном коэффициенте 1,59 для природного газа количество CO_2 -эквивалента составит 14,5 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 8,5 тыс. тонн для здания с централизованной системой ГВС. Именно на такое количество CO_2 -эквивалента потенциально можно снизить выбросы от теплоснабжения жилого здания с заданными характеристиками.

Обсуждение (Discussions)

Для качественной оценки энергетического эффекта от реализации локальной утилизации теплоты сточных вод в жилом здании необходимо знать точное количество тепловой энергии, расходуемое на нужды ГВС. Относительное значение расходуемой тепловой энергии на горячее водоснабжение в общей структуре теплотребления здания будет изменяться в зависимости от климатической зоны, но абсолютное значение этой нагрузки, вероятно, будет постоянным для каждого жилого здания в нашей стране (с учетом количества жильцов). Для России нет статистических данных о среднем количестве отдельных использований душевой человеком в течение суток, длительности этих использований и среднем массовом расходе воды в душе.

При расчете потенциального эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод в жилых зданиях в рамках отдельного населенного пункта или его части можно использовать данные, имеющиеся у теплоснабжающих предприятий относительно конкретных объектов теплоснабжения, управляющих компаний или непосредственно у собственника объекта теплоснабжения (в случае использования отдельных источников теплоснабжения для конкретного здания или индивидуальных поквартирных источников).

Также, для качественного определения энергетического эффекта важно учитывать влияние периода работы утилизационного ТОО при нестационарном тепловом режиме. Для каждого конкретного случая необходимо определять тепловую инерцию устройства (время, необходимое для достижения теплообменником стационарного теплового режима). В противном случае вероятно возникновение ситуации, при котором устройство никогда не достигает установившегося теплового режима, то есть не достигает максимальной располагаемой мощности (использование избыточного количества теплообменной площади), или используется нерационально малое количество площади теплообмена. Это может случаться при некорректном выборе параметров теплообменника или неверном определении условий эксплуатации водоразборного устройства.

Интересным для обсуждения вопросом является определение энергетического эффекта от локальной утилизации теплоты стоков от душевых в общественных зданиях и в бытовых помещениях промышленных предприятий. На основе имеющейся информации можно предположить, что эффективно использовать данный способ рекуперации теплоты стоков в общественных зданиях с регулярно используемыми душевыми (спортивные учреждения, общественные бани) или в душевых на промышленных объектах. Главное требование для расчета потенциального эффекта и проектирования устройства с оптимальными параметрами – это возможность определить режим работы водоразборных устройств на объекте (количество использований за расчетный период, длительность отдельного использования, массовый расход и т.д.) [5].

Для нашей страны при обсуждении локальной утилизации теплоты сточных вод экономический эффект занимает важное место, так как реализация данного способа на сегодняшний день является исключительно инициативой непосредственного пользователя

водоразборного устройства и производиться она будет в большинстве случаев с целью экономии денежных средств. На рис. 4 явно видно, что наименьшее необходимое количество использований душевой для того, чтобы окупить энергосберегающее мероприятие, прогнозируется при использовании электрической энергии для нагрева воды в децентрализованной системе ГВС. Для используемой в расчете конфигурации ТОА данное количество составляет $n \approx 2500$ использований. При использовании данного способа в централизованной системе ГВС и в децентрализованной системе с газовым водонагревателем необходимое количество использований составляет $n \approx 11000$ и $n \approx 18000$ соответственно. Для определения срока окупаемости в каждом конкретном случае необходимо знать, какое количество использований душевой происходит за расчетный период.

Допустим, что в квартире в течение каждых суток душевая используется четыре раза. Тогда при децентрализованном ГВС на основе электрической энергии период окупаемости составит примерно 1,5 года, при централизованном горячем водоснабжении 7,5 лет и при децентрализованной системе на основе газового водонагревателя 12 лет.

Можно сделать вывод, что для потребителей с централизованным и индивидуальным горячим водоснабжением на основе газового водонагревателя данное энергосберегающее мероприятие не является привлекательной инвестицией. Причиной этого является совокупность факторов: низкая цена на тепловую энергию, отсутствие стимулирующих факторов за проведение энергосберегающей политики частными лицами, организационные и материальные издержки при сравнительно большом сроке окупаемости.

Потенциальный экологический эффект от локальной утилизации теплоты стоков в душевых жилых домов существенен, но без привлекательной стимулирующей политики у пользователя водоразборного устройства отсутствует стремление проводить энергосберегающие мероприятия при актуальных ценах на тепловую энергию. Энергоснабжающие организации также не заинтересованы в проведении политики бережного использования ресурсов на стороне потребителя вплоть до возникновения конфликта интересов. Единственным источником поддерживающей политики в сторону подобных инициатив на данный момент представляется власть разного уровня.

Интересным для обсуждения является вопрос социального эффекта от рекуперации теплоты сточных вод в душевой. Предполагается, что снижение необходимого количества тепловой энергии для теплоснабжения здания стимулирует строительство в зонах, где единственным источником теплоты является электрическая энергия или цена на тепловую энергию сравнительно высока. При внедрении ресурсосберегающих технологий в систему отопления, вентиляции, горячего и холодного водоснабжения проживание на таких территориях становится более доступным с материальной точки зрения. Подобное влияние сложно отследить, проанализировать и рассчитать эффект, но мировой опыт использования локальной утилизации стоков показывает, что данная технология находит практическое применение при существовании вышеуказанных условий.

Выводы (Conclusions)

1. Получены данные о потенциальном энергетическом эффекте от локальной утилизации теплоты сточных вод в душевой для жилого здания с заданными параметрами. Относительная экономия тепловой энергии в рамках годового теплопотребления здания с децентрализованной системой ГВС составила 5,3 %, а для здания с централизованной системой ГВС составила 3,1 %. В абсолютных значениях экономия тепловой энергии составила для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС $E' = 64$ Гкал и $E'' = 37$ Гкал соответственно.

2. Определена экономия денежных средств для оплаты тепловой энергии на нужды ГВС при использовании локальной утилизации теплоты сточных вод в душевых: 43% и 25% для децентрализованных и централизованных систем ГВС соответственно.

3. Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия для рассматриваемого случая (условий эксплуатации теплообменника и его конфигурации) составит: 1,5 года при децентрализованном горячем водоснабжении на основе электрического проточного водонагревателя; 7,5 лет при централизованной системе ГВС; 12 лет при децентрализованной системе ГВС на основе газового проточного водонагревателя.

4. Определена экономия топлива для жилого здания с заданными параметрами: 9145 т.у.т. и 5227 т.у.т. для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС соответственно.

5. Определено количество CO_2 -эквивалента для сэкономленного количества топлива. При использовании каменного угля количество CO_2 -эквивалента составит 25,2 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 14,6 тыс. тонн для здания с

децентрализованной системой ГВС. Для природного газа количество CO_2 -эквивалента составит 14,5 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 8,5 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС.

6. Для более точного и полного расчета эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод в рамках конкретного объекта теплоснабжения в нашей стране необходимы корректные статистические данные о поведении непосредственных пользователей сетей ГВС в России.

Литература

1. Королев В. И., Зверева Э.Р. Российский опыт применения отходов химводоподготовки в хозяйственной деятельности: перспективы использования при обработке осадков сточных вод (обзорная статья) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 6. С. 47-62.
2. Куницкий В. А., Лукин С.В. Исследование нестационарных режимов работы утилизационного теплообменного устройства на основе математического моделирования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 4(56). С. 69-79.
3. Куницкий В.А., Лукин С.В. Устройство для утилизации теплоты сточных вод, образующихся при использовании душевой. Патент РФ на полезную модель №223347. 14.02.2024. Бюл. №5. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=223347&TypeFile=html. Ссылка активна на 9 апреля 2024.
4. Куницкий В. А., Лукин С.В. Верификация нестационарной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата на основе экспериментального испытания // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3(59). С. 57-69.
5. Soloveva O., Solovev S., Kunitsky V. et al. Determination of the optimal heat exchanger configuration for wastewater heat recovery // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023); 9-13 October 2023; Voronezh, Russia. Vol. 458.
6. Бежан А.В. Оценка потенциала тепла сточных вод в многоквартирных жилых зданиях (на примере города Апатиты) // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №2(15). С. 33-40.
7. Кологривых А.С., Семиненко А.С. Тепловой потенциал канализационных стоков // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7. Ч.2. С. 57-58.
8. Андрианов А.П., Грибков А.Н. Использование тепловой энергии сточных вод // Инженерный Вестник Дона. 2023. №7.
9. Васильев Г.П., Дмитриев А.Н., Абуев И.М. и др. Утилизация теплоты сточных вод многоквартирных жилых домов // ЭНЕРГИЯ: ЭКОНОМИКА, ТЕХНИКА, ЭКОЛОГИЯ. 2013. № 8. С. 44-48.
10. Юсупов Р.Д., Зиганшин Ш.Г., Политова Т.О. и др. Применение солнечной энергии для нужд горячего водоснабжения в городе Казань // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 48-58.
11. Shahmohammadi S., Steinmann Z., King H. et al. The influence of consumer behavior on energy, greenhouse gas and water footprints of showering // Journal of Industrial Ecology. 2019. Vol. 23, N5. pp. 1186-1195.
12. Meireles I., Sousa V., Bleys B. et al. Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 157.
13. Binks A.N., Kenway S.J., Lant P.A. The effect of water demand management in showers on household energy use // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 157. pp. 177-189.
14. Sousa V., Silva C.M., Meireles I. Performance of water efficiency measures in commercial buildings // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 143. pp. 251-259.
15. Edwards S., Beausoleil-Morrison I., Laperriere A. Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems // Solar Energy. 2015. Vol. 111. pp. 43-52.
16. Garcia M. A., Diaz R.J.A., Morillo G.J. et al. Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks Using Micro-Hydropower in Spain // Water. 2021. Vol. 13, N5.
17. Mitrovic D., Chacon M.C., Garcia A.M. et al. Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU // Water. 2021. Vol. 13, N7.
18. Liu Z., Huang Q., He C. et al. Water-energy nexus within urban agglomeration: An assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 164.

19. Pomianowski M.Z., Johra H., Marszal-Pomianowska A. et al Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 128.

20. Анализ потребления тепловой энергии на отопление многоквартирных домов, как способ повышения энергоэффективности в сфере ЖКХ [Электр. текст]. Аналитический центр при Правительстве РФ. Режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/content/1290/16-12-13-analitika-zkh-3-pdf.pdf>. Дата обращения: 09.04.2024.

Авторы публикации

Лукин Сергей Владимирович – докт. техн. наук, профессор кафедры теплогазоснабжения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», s.v.luk@yandex.ru

Куницкий Вячеслав Андреевич – старший преподаватель и аспирант кафедры теплогазоснабжения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», globee@mail.ru

References

1. Korolev VI, Zvereva ER. Russian experience in the use of chemical water treatment waste in economic activity: prospects for use in the treatment of sewage sludge (review article). *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(6):47-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-47-62>
2. Kunitskiy VA, Lukin SV. Research of non-stationary operation modes of utilization heat exchanger on the basis of mathematical modeling. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14(55):69-79. (In Russ.)
3. Kunitskiy VA, Lukin SV. Ustroystvo dlya utilizatsii teploty stochnykh vod, obrazuyushchikhsya pri ispol'zovanii dushevoy. Patent RUS №223347. 14.02.2024. Byul. №5. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=223347&TypeFile=html. Accessed: 08 Apr 2024. (In Russ.)
4. Kunitskii VA, Lukin SV. Verification of the non-stationary mathematical model of the utilization heat exchanger thermal operation by experimental testing. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2023; 15; 3(59). 57-69. (In Russ.)
5. Soloveva O, Solovev S, Kunitsky V, et al. Determination of the optimal heat exchanger configuration for wastewater heat recovery // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023); 9-13 October 2023; Voronezh, Russia. (458). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801024>
6. Bezhan AV. Assessing the potential of sewage heat in apartment buildings (for example Apatity). *Transactions Kola Science Centre*. 2013; 2(15):33-40. (In Russ.)
7. Kologrivyykh AS, Seminenko AS. Teplovoy potentsial kanalizatsionnykh stokov // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014;7 (Pt 2):57-58. (In Russ.)
8. Andrianov AP, Gribkov AN. Ispol'zovanie teplovoy energii stochnykh vod // *Inzhenernyy Vestnik Dona*. 2023; 7. (In Russ.)
9. Vasilev GP, Dmitriev AN, Abuev IM, et al. Utilizatsiya teploty stochnykh vod mnogokvartirnykh zhilykh domov // *ENERGIYA: EKONOMIKA, TEKHNIKA, EKOLOGIYA*. 2013; 8:44-48. (In Russ.)
10. Yusupov RD, Ziganshin SG, Politova TO, et al. Application of solar energy for the needs of hot water supply in the city of Kazan. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14; 2(54):48-58. (In Russ.)
11. Shahmohammadi S, Steinmann Z, King H, et al. The influence of consumer behavior on energy, greenhouse gas and water footprints of showering. *Journal of Industrial Ecology*. 2019. 23(5):1186-1195. <https://doi.org/10.1111/jiec.12858>
12. Meireles I, Sousa V, Bleys B, et al. Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112035>.
13. Binks AN, Kenway SJ, Lant PA. The effect of water demand management in showers on household energy use. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 157:177-189. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.128>
14. Sousa V, Silva CM, Meireles I. Performance of water efficiency measures in commercial buildings. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 143:251-259. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.013>

15. Edwards S, Beausoleil-Morrison I, Laperriere A. Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems. *Solar Energy*. 2015; 111:43-52. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.026>
16. Garcia MA, Diaz RJA, Morillo GJ et al. Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks Using Micro-Hydropower in Spain. *Water*. 2021; 13(5). <https://doi.org/10.3390/w13050691>
17. Mitrovic D, Chacon MC, Garcia AM et al. Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU. *Water*. 2021; 13(7). <https://doi.org/10.3390/w13070899>
18. Liu Z, Huang Q, He C et al. Water-energy nexus within urban agglomeration: An assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 164. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105113>
19. Pomianowski MZ, Johra H, Marszal-Pomianowska A et al. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; (128). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
20. Analiz potrebleniya teplovoy energii na otoplenie mnogokvartirnykh domov, kak sposob povysheniya energoeffektivnosti v sfere ZhKKh [Electronic resource]. Analytical center for the government of the Russian Federation. Available at: <https://ac.gov.ru/files/content/1290/16-12-13-analitika-zkh-3-pdf.pdf>. Accessed: 09 Apr 2024. (In Russ).

Authors of the publication

Sergey V. Lukin – Vologda State University, Vologda, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3002-1078>. s.v.luk@yandex.ru

Vyacheslav A. Kunitskiy – Vologda State University, Vologda, Russia. globee@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено	09.04.2024 г.
Отредактировано	02.05.2024 г.
Принято	19.06.2024 г.