



## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Куницкий В.А., Лукин С.В.

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

globe@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Авторами исследуется локальная утилизация теплоты сточных вод (в непосредственной близости к месту их образования) на основе теплообменного аппарата. Для подбора рациональных характеристик теплообменника и корректной оценки потенциального энергетического эффекта необходимо учитывать влияние условий эксплуатации устройства (длительность отдельного использования душевой, массовый расход сред, температура нагреваемой воды на входе в теплообменник, температура сред в момент включения устройства). *ЦЕЛЬ.* Цель работы заключается в исследовании зависимости эффективности утилизации теплоты сточных вод от условий эксплуатации теплообменника и выявлении параметров, оказывающих наибольшее влияние на эффект от энергосберегающего мероприятия. *МЕТОДЫ.* На основе верифицированной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменника вычисляется распределение температуры внутри потоков нагреваемой и греющей среды во времени (с момента включения и до достижения стационарного режима работы). На основе полученных данных (температуры нагреваемой воды на выходе из теплообменника в каждый момент времени) определяется абсолютная и относительная экономия теплоты при различных условиях эксплуатации. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассмотрено влияние нестационарной фазы работы теплообменника на его энергетическую эффективность. Для конкретной конфигурации теплообменника определено время, за которое устройство достигает стационарного режима тепловой работы. Выявлено, что наибольшее влияние на относительную и абсолютную экономию тепловой энергии оказывают такие условия эксплуатации, как массовый расход и температура нагреваемой воды на входе в теплообменник. Наименьшее влияние на энергетический эффект оказывает температура сред в начальный момент времени. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определены условия эксплуатации, оказывающие наибольшее влияние на эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод. Подтверждена необходимость учета данных условий при проектировании теплообменника и выборе его оптимальных параметров.

**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. Характеристики теплообменника для локальной утилизации теплоты сточных вод при различных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-176-186.

## THE CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGER FOR LOCAL UTILIZATION OF WASTEWATER HEAT UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

Kunitskiy V.A., Lukin S.V.

Vologda State University, Vologda, Russia

globe@mail.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* The authors research the local utilization of wastewater heat (in close proximity to the place of their formation) based on a heat exchanger. To select rational characteristics of the heat exchanger and correctly assess the potential energy effect, it is necessary to take into account the influence of the operating conditions of the device (duration of individual use of the shower, mass flow of heated and heating water, temperature of heated water at the inlet to the heat exchanger, temperature of the flow at the moment the device is turned on). *THE PURPOSE.* The purpose of the work is to research the dependence of the efficiency of wastewater heat utilization on the operating conditions of the heat exchanger and to identify the parameters that have the greatest impact on the effect of energy-saving measures. *METHODS.* Based on a verified mathematical model of the thermal operation of a recovery heat exchanger, the temperature distribution inside the flows of the heated and heating water in time is calculated (from the moment of switching on until reaching a stationary operating mode). Based on the data obtained (the temperature of the heated water at the outlet of the heat exchanger at each point in time), the absolute and relative heat savings are determined under various operating conditions. *RESULTS.* The influence of the non-stationary phase of the heat exchanger operation on its energy efficiency is considered. For a specific heat exchanger configuration, the time required for the device to reach a steady state of thermal operation is determined. It was revealed that the greatest influence on the relative and absolute savings of thermal energy is exerted by such operating conditions as mass flow and temperature of heated water at the entrance to the heat exchanger. The temperature of the flow at the initial moment of time has the least influence on the energy effect. *CONCLUSION.* The operating conditions that have the greatest impact on the effect of local wastewater heat recovery are determined. The need to take these conditions into account when designing a heat exchanger and choosing its optimal parameters has been confirmed.

**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. The characteristics of heat exchanger for local utilization of wastewater heat under different operating conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-176-186.

### **Введение (Introduction)**

На данный момент в России практически вся сточная вода, образующаяся в жилых и общественных зданиях, а также в помещениях бытового назначения на промышленных объектах, удаляется в канализационные сети без какого-либо полезного использования тепловой энергии, которой она обладает [1].

Существуют разные способы утилизации теплоты сточных вод, различающиеся по объёму утилизируемых стоков (сточные воды, собранные от отдельного водоразборного устройства, группы устройств, целого здания, группы зданий, микрорайона, населенного пункта, агломерации) и по виду используемой техники (кожухотрубные теплообменные аппараты или системы утилизации на основе теплового насоса) [2].

Авторами исследуется локальная утилизация теплоты сточных вод, образующихся в душевой, на основе теплообменного аппарата (ТОА). При помощи ТОА осуществляется предварительный нагрев холодной воды, планируемой к использованию в водоразборном устройстве, на основе отбора теплоты у удаляемых горячих сточных вод [3]. При этом ТОА располагается в непосредственной близости к водоразборному устройству, что обеспечивает теплообмен между средами при максимальном располагаемом температурном напоре. Данный способ имеет самые низкие капитальные, организационные и технические затраты. При этом позволяет отдельному потребителю тепловой энергии (например, домохозяйству) повышать эффективность использования сетей ГВС при сроке окупаемости до двух лет.

Принципиальная схема душевой с децентрализованным обеспечением ГВС и локальной утилизацией стоков представлена на рисунке 1.

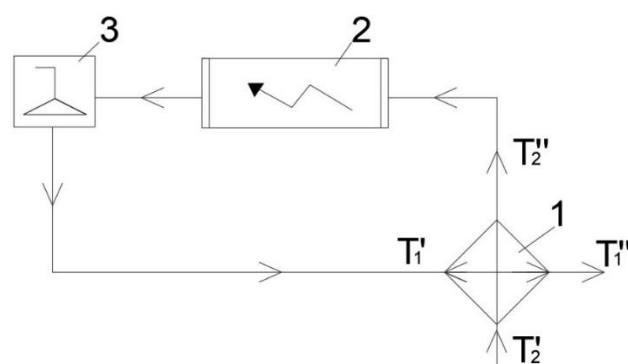


Рис. 1. Принципиальная схема душевой с локальной утилизацией теплоты сточной воды, где 1 – утилизационный теплообменный аппарат; 2 – проточный водонагреватель, 3 – водоразборное устройство (душ),  $T_2''$  – температура нагреваемой воды на входе в ТОА,  $T_2''$  – температура нагреваемой воды на выходе из ТОА,  $T_1'$  – температура воды, использующейся в душевой (температура греющей сточной воды на входе в ТОА),  $T_1''$  – температура греющей сточной воды на выходе из ТОА

Fig. 1. Schematic diagram of a shower with local wastewater heat utilization, where 1 – heat exchanger; 2 – instantaneous water heater, 3 – water dispensing device (shower),  $T_2''$  – temperature of the heated water at the inlet to the shower,  $T_2''$  – temperature of the heated water at the outlet from the shower,  $T_1'$  – temperature of the water used in the shower (temperature of the heating waste water at the inlet to the shower),  $T_1''$  – temperature of heating waste water at the outlet of the TOA

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

Изображение утилизационного теплообменного аппарата в общем виде представлено на рисунке 2.

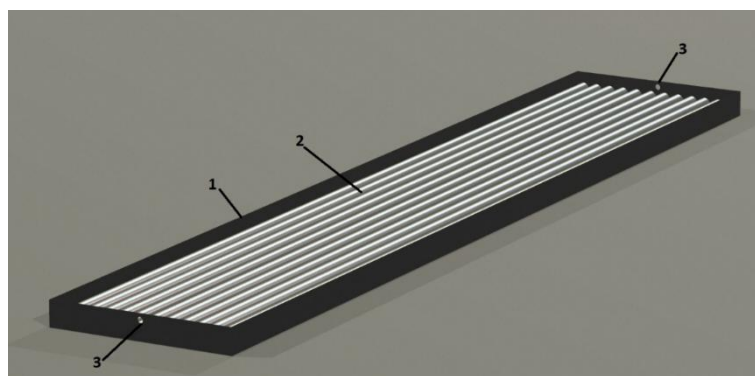


Рис. 2. Схематичное изображение теплообменного устройства, где 1 – корпус ТОУ; 2 – стальные трубы с холодной водой (нагреваемой средой); 3 – отверстия для подачи воды в корпус ТОА (удаления из корпуса)

Fig. 2. 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.

При реализованной на рисунке 1 схеме энергетический эффект от утилизации теплоты сточных вод выражается в снижении требуемой мощности проточного водонагревателя из-за предварительного нагрева холодной воды. Использование такого способа утилизации теплоты стоков возможно и при централизованном ГВС, но с отличием лишь в том, что энергетическим эффектом в данном случае станет снижение необходимого количества горячей воды для использования в душе.

Подобные утилизационные теплообменники, работающие с одним или с группой водоразборных устройств распространены на рынках развитых стран или стран с высокой стоимостью тепловой энергии. На основе мирового опыта развития топливно-энергетических комплексов можно предположить, что и перед Россией со временем встанет задача полезного использования теплоты, теряющейся со сточными водами.

Анализ работ отечественных ученых, посвященных проблеме утилизации теплоты хозяйственно-бытовых стоков, показывает, что данный вопрос рассмотрен подробно и содержательно. Расчет энергетического потенциала, доступного при утилизации хозяйственно-бытовых стоков, на примере конкретного населенного пункта представлен в публикации Бежана А.В. [4]. В работе коллектива авторов Васильева Г.П., Дмитриева А.Н., Абуева И.М., Юрченко И.А. приведена классификация способов утилизации теплоты стоков по объёму утилизируемых сточных вод и по типу используемой техники, а также выделены преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых способов [5]. Ученые Кобылкин М.В., Кобылкина А.В., Риккер Ю.О. занимались вопросом разработки малогабаритного рекуператора для утилизации теплоты хозяйственно-бытовых стоков [6]. В работе Владыкиной А.Н. приводятся известные на данный момент способы повышения эффективности энергопотребления общественными и жилыми зданиями [7]. В работе Файзулина А.А. и Мамлеева А.Р. рассматривается способ утилизации сточных вод на основе теплонасосной установки [8]. В исследовании Выборнова Д.В., Удовиченко З.В. и Долгова Н.В. приводятся наиболее часто возникающие проблемы при утилизации теплоты сточных вод [2]. В работе коллектива авторов Юсупова Р.Д., Зиганшина Ш.Г., Политовой Т.О. и Базуковой Э.Р. приводится способ обеспечения горячего водоснабжения на основе солнечной энергии [9]. В работе Запольской И. Н. исследуется взаимосвязь между использованием индивидуальных подогревателей воды домохозяйствами в многоквартирном доме и общим теплопотреблением жилого здания [10].

В работах зарубежных авторов также обстоятельно исследуется проблема утилизации теплоты сточных вод. В публикациях коллектива авторов Sadegh Shahmohammadi, Zoran Steinmann, Henry King, Hilde Hendrickx, Mark A.J. Huijbregts детально рассматриваются особенности эксплуатации душевых среднестатистическим человеком: приводятся данные о значении среднего массового расхода воды в душевой, длительности отдельного использования душевой, количестве приемов душа в день [11]. Новицкая М.П. в научной публикации исследует способ локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата [12]. В работе Ziwen Liu, Qingxu Huang, Chunyang He, Changbo Wang, Yihang Wang, Kaixin Li исследуется возможность создания цифрового двойника реальной системы теплоснабжения городской агломерации [13]. В исследовании Sitzenfrei R., Hillebrand S. и Rauch W. анализируются преимущества и недостатки централизованных и децентрализованных систем утилизации теплоты хозяйственно-бытовых стоков [14]. В работе Feike F., Oltmanns J., Dammel F., Stephan P. приводится информация по повышению эффективности утилизации теплоты сточных вод на теплонасосной станции путем автоматизации [15]. Коллектив авторов Meireles I., Sousa V., Bleys B. и Poncelet B. в своей работе определяет среднее количество потребляемой горячей воды домохозяйством на основе данных о теплопотреблении нескольких тысяч квартир [16]. Исследователи M.Z. Pomianowski, H. Johra, A. Marszal-Pomianowska, C. Zhang работают над вопросом автоматического управления отдельными водоразборными устройствами, используемыми домохозяйствами, с целью оптимизации времени их работы [17]. Ученые Dmytro Ivanko, Åse Lekang Sorensen, Natasa Nord занимаются вопросом моделирования теплопотребления зданиями с целью прогнозирования необходимого количества теплоты отдельным теплоснабжающим объектом [18].

Как было сказано выше компактные теплообменники для локальной утилизации теплоты стоков распространены на рынках развитых стран или стран с высокими ценами на тепловую энергию. При этом данные устройства представлены в виде серийных изделий разных типоразмеров, отличающихся площадью теплообменной поверхности и, следовательно, потенциальным энергетическим эффектом. Данный подход производителей не учитывает конкретные условия эксплуатации водоразборного устройства, что не позволяет корректно рассчитать энергетический эффект от внедрения энергосберегающего мероприятия, а также способствует выбору устройства с нерациональным типоразмером.

Так как все водоразборные устройства работают в разном режиме и при разных условиях эксплуатации, то актуальна проблема подбора оптимальных параметров утилизационного ТОО для каждого конкретного случая. Подбор рациональных параметров напрямую влияет на энергетическую эффективность устройства, экономический и экологический эффект. Основной особенностью такого теплообменника является то, что он работает только во время использования душевой. В момент включения вода в межтрубном

пространстве и внутри труб имеет одинаковую температуру, равную температуре внутреннего воздуха в помещении. Следовательно, существенную часть времени своей работы устройство работает при нестационарном режиме и данный факт необходимо учитывать для корректного расчета энергетического эффекта.

В данной статье представлены результаты расчета характеристик утилизационного ТОА при разных условиях эксплуатации, полученные на основе авторской верифицированной математической модели тепловой работы ТОА [19].

**Цель работы** заключается в исследовании зависимости эффективности утилизации теплоты сточных вод от условий эксплуатации ТОА.

**Научная значимость** исследования состоит в получении закономерностей, описывающих влияние теплофизических и режимных параметров ТОА на количество полезно утилизированной тепловой энергии отдельным теплообменным устройством.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке и обосновании расчетно-экспериментальной методики проектирования утилизационных теплообменников на базе использования разработанной математической модели тепловой работы утилизационного ТОА.

**Практическая значимость** исследования состоит в разработке программного обеспечения для расчета тепловой работы утилизационного ТОА и формулировании рекомендаций для совершенствования систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты стоков.

К условиям эксплуатации относятся: температура потоков сред в начальный момент времени  $T(x, \tau=0)$ , °С, условно равная температуре внутреннего воздуха в помещении, в котором располагается ТОА; длительность отдельного использования душевой,  $\tau_0$ , с; температура нагреваемой среды на входе в ТОА,  $T_2' = t_x$ , °С; массовый расход греющей и нагреваемой среды,  $G$ , кг/с (в данном случае массовый расход греющей и нагреваемой среды равны) [20].

К характеристикам теплообменника относятся: средняя мощность ТОА в течение отдельного использования душа; количество полезно утилизированной тепловой энергии в течение отдельного использования душевой; относительное снижение требуемой тепловой энергии для работы душевой; тепловая инерция теплообменника (количество времени с момента включения устройства, необходимое для достижения теплообменником стационарного режима работы); средняя мощность ТОА в течение отдельного использования душевой.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В работе используются следующие методы научного исследования: математическое моделирование тепловой работы утилизационного ТОА с заданными параметрами; абстрагирование (упрощение представления реального процесса теплообмена между двумя средами через стенку трубки); анализ и сравнение полученных расчетным путем характеристик теплообменника при разных условиях эксплуатации.

На основе математического моделирования исследуется тепловая работа ТОА при разных условиях эксплуатации. Результатом расчета являются функции, описывающие распределение температуры внутри нагреваемого и греющего потока в пространстве и времени:  $T_2(x, \tau)$  и  $T_1(x, \tau)$  соответственно.

В данной статье исследуется утилизационный теплообменник с уже заданными геометрическими и теплотехническими параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Технические характеристики ТОУ

Technical characteristics of TUU

Параметр	Расчетное значение параметра
Длина труб, м	2
Количество труб, шт	10
Диаметр трубы, $d_{вн}/d_{н}$ , м	0,021 / 0,024
Габариты корпуса ТОА (длина, ширина, высота), м	2 / 0,3 / 0,15
Расчетная площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup>	1,15
Массовый расход греющей и нагреваемой среды, $G$ , кг/с	0,1; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18
Температура нагреваемой среды на входе в ТОУ, $t_r$ , °С	5; 10; 15; 20
Температура греющей среды на входе в ТОУ, $t_x$ , °С	40
Температура потоков сред в начальный момент времени $T(x, 0)$	18; 20; 22; 24
Длительность отдельного использования душевой, $\tau_0$ , с	420

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

**Результаты (Results)**

На рисунке 3 представлено распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени  $\tau$ , полученное на основе математического моделирования, при заданных условиях.

Для аналитического расчета принимается, что в начальный момент времени (в момент начала использования душевой) температура внутри нагреваемого и греющего потока одинакова и равна температуре внутреннего воздуха. После включения наблюдается нестационарный режим тепловой работы теплообменника, сменяющийся условно стационарным. Графики распределения температуры (5) и (6) на рис. 3 практически одинаковы, следовательно, для данного случая установившийся тепловой режим работы наступает в интервале от 4 до 5 минут после включения устройства.

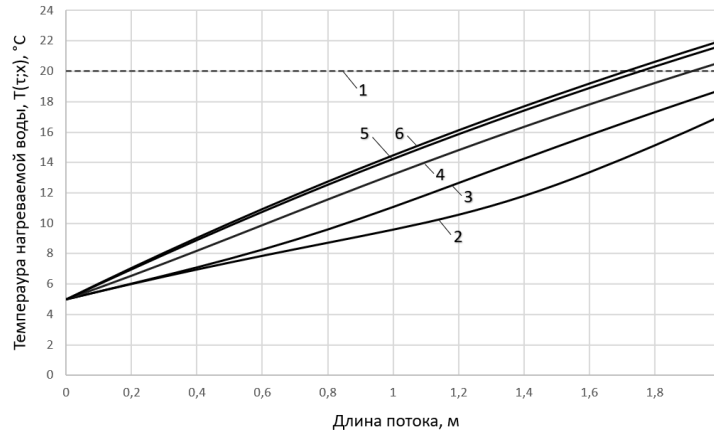


Рис. 3. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТОУ, где 1 –  $\tau = 0$  с; 2 –  $\tau = 60$  с; 3 –  $\tau = 120$  с; 4 –  $\tau = 180$  с; 5 –  $\tau = 240$  с; 6 –  $\tau = 300$  с

Fig. 3. 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.

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

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

где  $G$  – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с;  $c_p$  – теплоемкость воды Дж/(кг·K);  $t_e = 40$  – 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·K).

На основе полученных данных о распределении температуры внутри потока во времени (рис. 3) определяется мощность теплообменного аппарата в каждый момент времени  $\tau$  по формуле:

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

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

При использовании душевой в течение 7 минут количество полезно утилизированной теплоты, идущей на нагрев холодной воды, определяется на основе значения мощности ТОА 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 ТОА в момент времени  $\tau$ , Вт;  $\tau_0$  – длительность отдельного использования душа, с.

Средняя мощность ТОА 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:  $\varphi = (\Delta Q / Q) \cdot 100\%$ .

На основе математического моделирования и формул (1-3) определены характеристики тепловой работы ТОА при массовом расходе сред  $G = 0,14$  кг/с, начальном распределении температуры в обоих потоках  $T(x,0) = 20$  °С, но разным значении температуры нагреваемой воды на входе в ТОА. Прочие данные для моделирования взяты из таблицы 1. Результат расчета представлен в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Характеристики тепловой работы ТОА  
Characteristics of thermal operation of TOA

Температура нагреваемой воды на входе в ТОА, $t_{вх}$ , °С	Тепловая инерция, $\Delta t$ , с	Необходимое количество теплоты, $Q$ , кДж	Количество полезно утилизированной теплоты, $\Delta Q$ , кДж	Экономия теплоты, $\varphi$ , %
5	308	8644	3877	44,9
10	330	7409	3198	43,2
15	300	6174	2521	40,8
20	320	4939	1842	37,3

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

Исследование влияния массового расхода сред на тепловую работу ТОА проводилось при  $t_x = 5$  °С и начальном распределении температуры в потоках сред  $T(x,0) = 20$  °С. При увеличении массового расхода нагреваемой и греющей среды с  $G = 0,1$  кг/с до  $G = 0,18$  кг/с уменьшается тепловая инерция ТОА с 280 секунд до 210 секунд. При этом увеличивается абсолютная экономия, но уменьшается относительная экономия тепловой энергии: при  $G = 0,1$  кг/с  $\Delta Q = 3404$  кДж и  $\varphi = 55,1$  %; при  $G = 0,18$  кг/с  $\Delta Q = 4181$  кДж и  $\varphi = 37,6$  %.

Исследование влияния начального распределения температуры на тепловую работу ТОА проводилось при  $t_x = 5$  °С,  $G = 0,14$  кг/с. При увеличении температуры нагреваемой и греющей среды в начальный момент времени (температуры внутреннего воздуха в помещении, в котором располагается ТОА) увеличивается абсолютная и относительная экономия теплоты: при  $T(x,0) = 18$  °С  $E = 3790$  кДж и  $\varphi = 43,9$  %; при  $T(x,0) = 24$  °С  $E = 4052$  кДж и  $\varphi = 46,9$  %. Тепловая инерция устройства при этом практически не меняется (относительная разница составляет  $\approx 1\%$ ).

На рис. 4 представлены графики, описывающие тепловую работу утилизационного теплообменника и энергетический эффект от его использования в зависимости от длительности работы устройства (длительности использования душевой). Температура нагреваемой среды на входе в ТОА принималась  $t_x = 5$  °С, начальное распределение температуры в потоках  $T(x,0) = 20$  °С, массовый расход сред  $G = 0,14$  кг/с.

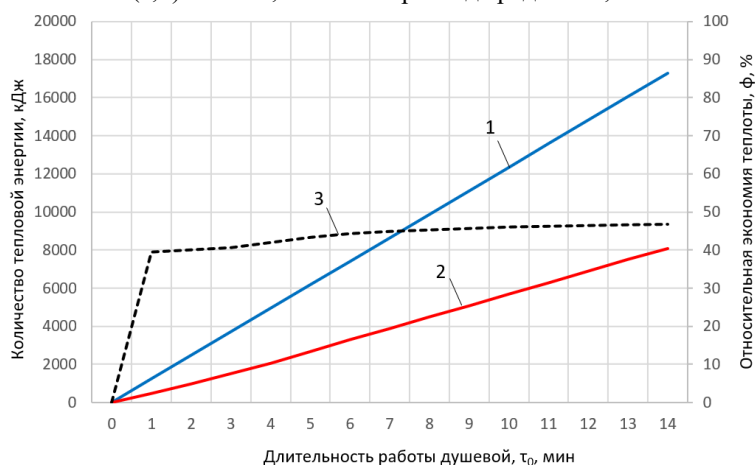


Рис. 4. Зависимость необходимой тепловой энергии для работы душа и сэкономленной тепловой энергии от длительности работы душа, где 1 – требуемое количество тепловой энергии для работы душевой,  $Q$ , кДж; 2 – сэкономленное количество тепловой энергии,  $\Delta Q$ , кДж; 3 – относительное снижение требуемой тепловой энергии,  $\varphi$ , %

Fig. 4. Dependence of the required thermal energy for the operation of the shower and the saved thermal energy on the duration of the shower, where 1 – the required amount of thermal energy for the operation of the shower,  $Q$ , kJ; 2 – saved amount of thermal energy,  $\Delta Q$ , kJ; 3 – relative reduction in required thermal energy,  $\varphi$ , %

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

### **Обсуждение (Discussing)**

Анализ результатов моделирования тепловой работы теплообменника показывает, что все исследуемые в работе условия эксплуатации влияют и на значение тепловой инерции, и на экономию тепловой энергии.

Особое внимание следует уделить влиянию температуры нагреваемой воды на эффективность утилизации теплоты (таблица 2). Относительное значение экономии теплоты при этом меняется незначительно (при  $t_{вх}=5^{\circ}\text{C}$  относительная экономия  $\varphi=44,9\%$ , а при  $t_{х}=20^{\circ}\text{C}$  относительная экономия  $\varphi=37,3\%$ ). Но в абсолютных значениях экономия теплоты различается существенно (при  $t_{х}=5^{\circ}\text{C}$  абсолютная экономия теплоты  $\Delta Q=3877$  кДж, а при  $t_{х}=20^{\circ}\text{C}$  значение составляет  $\Delta Q=1842$  кДж). Данный факт объясняется необходимостью большего количества тепловой энергии для обеспечения нужд ГВС в холодный период года и, следовательно, потенциально большей абсолютной экономией теплоты.

Существенное влияние на эффективность утилизации также оказывает массовый расход сред. При  $G=0,1$  кг/с экономия тепловой энергии  $\varphi=55,1\%$ ;  $\Delta Q=3404$  кДж, а при  $G=0,18$  кг/с экономия тепловой энергии  $\varphi=37,6\%$ ;  $\Delta Q=4181$  кДж. Данный факт объясняется прямой зависимостью значений скорости сред от массового расхода. При меньшей скорости время теплообмена между средами увеличивается, но вместе с этим увеличивается и тепловая инерция устройства.

В меньшей степени оказывают влияние на тепловую работу устройства начальное распределение температуры. Закономерно, что в одинаковых условиях, отличающихся только начальной температурой греющей среды, большее количество теплоты будет сообщено холодной воде при наибольшей начальной температуре греющей воды. Так как область возможных значений температуры внутреннего воздуха сравнительно мала (согласно нормативной литературе), то и разница в абсолютных и относительных значениях сэкономленной тепловой энергии незначительна.

Анализ графиков на рис. 4 показывает важность учета фазы работы теплообменника при нестационарном тепловом режиме для корректного определения энергетического эффекта. Видно, что после определенного времени работы душевой (6-7 минут) количество полезно утилизированной тепловой энергии составляет  $\approx 47\%$  и не возрастает со временем. Это максимальное располагаемое значение экономии теплоты для данного устройства и заданных условий эксплуатации. В случае использования теплообменника с такими параметрами в душевой, которая работает менее 6 минут, теплообменник всегда будет работать при нестационарном тепловом режиме и, следовательно, во время работы не будет достигать максимальной располагаемой мощности.

### **Заключение (Conclusions)**

1. Получены данные о влиянии условий эксплуатации утилизационного теплообменника (массовый расход сред, начальное распределение температуры внутри потоков сред, температура нагреваемой воды на входе в теплообменник) на энергетический эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод.

2. Чтобы корректно определить энергетический эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод, условия эксплуатации теплообменного аппарата необходимо учитывать в каждом конкретном случае отдельно.

3. Наибольшее влияние на тепловую работу ТОА имеют массовый расход сред, температура холодной воды на входе в теплообменник и длительность отдельного использования душевой.

4. При проектировании утилизационного теплообменника возможен подбор лишь оптимальных параметров для конкретного случая, но не идеальных, так как кроме потенциального энергетического эффекта и срока окупаемости необходимо учитывать актуальную энергетическую, экономическую и экологическую политику, реализуемую в отношении определенного объекта теплоснабжения, а также доступный объем капитальных затрат на реализацию энергосберегающего мероприятия.

### **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. Выборнов Д.В., Удовиченко З.В., Долгов Н.В. Исследование проблем утилизации теплоты канализационных стоков жилых зданий // Энергетические системы. 2021. Т. 6. № 1. С. 70-80.



3. 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.
4. 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.
5. Васильев Г.П., Дмитриев А.Н., Абуев И.М. и др. Квартирная утилизация теплоты сточных вод // Энергетик. 2013. № 12. С. 30-33.
6. Кобылкин М.В., Кобылкина А.В., Риккер Ю.О. Разработка эффективного бытового малогабаритного рекуператора теплоты сточных вод // Материалы XX Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов»; В 3-х частях, Чита, 30 ноября 2020 г., Чита: Забайкальский государственный университет, 2020. С. 128-132.
7. Владыкина А. Н. Повышение энергетической эффективности жилых домов // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 7. С. 121-126.
8. Файзуллин А. А., Мамлеев А.Р. Теплонасосная установка для утилизации теплоты городских сточных вод // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 8-ми томах; 10–11 декабря 2019 г., Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. Т. 7. С. 100-101.
9. 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.
10. Запольская И.Н. Влияние индивидуальных водо-водяных подогревателей на потребление тепловой энергии многоквартирными домами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 146-155.
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. Новицкая М. П. Теплообменный аппарат для утилизации теплоты сточных вод домохозяйства // Коммунальная и промышленная энергетика. 2018. Т.40(№1). С. 56-60.
13. Ziwen L., Qingxu H., Chunyang H. 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, pp. 105-113.
14. Sitzenfrie R., Hillebrand S., Rauch W. Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems // Water Science and Technology. 2017. Vol.75 N5-6. pp. 1243-1250.
15. Feike F., Oltmanns J., Dammel F. et al. Evaluation of the waste heat utilization from a hot-water-cooled high performance computer via a heat pump // Energy reports. 2021. Vol. 7. pp. 70-78.
16. 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.
17. 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.
18. Ivanko D., Sorensen A.L., Nord N. Selecting the model and influencing variables for DHW heat use prediction in hotels in Norway // Energy and Buildings. 2020. Vol. 228.
19. 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.
20. 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.

#### Авторы публикации

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

**Куницкий Вячеслав Андреевич** – преподаватель и аспирант кафедры теплогазоводоснабжения,

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», globee@mail.ru.

### References

1. Korolev V.I., Zvereva E.R. 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. Vybornov D.V., Udovichenko Z.V., Dolgov N.V. Research of the problems of heat recovery of sewerage flows in residential buildings. *Energy Systems*. 2021; 6(1):70-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/es.2021.1.006>
3. Kunitskiy V.A., Lukin S.V. 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.)
4. Bezhan A.V. Assessing the potential of sewage heat in apartment buildings (for example Apatity). *Transactions Kola Science Centre*. 2013; 2(15):33-40. (In Russ.)
5. Vasil'ev G.P., Dmitriev A.N., Abuev I.M., et al. Kvartirnaya utilizatsiya teploty stochnykh vod. *Energetik*. 2013; 12:30-33. (In Russ.)
6. Kobylkin M.V., Kobylkina A.V., Rikker Yu.O. Razrabotka effektivnogo bytovogo malogabaritnogo rekuperatora teploty stochnykh vod. In: *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 30 Nov 2020; Chita, Russia*. Chita: Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet, 2020. pp. 128-132. (In Russ.)
7. Vladykina A. N. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti zhilykh domov. *Ustoichivoe razvitie nauki i obrazovaniya*. 2019; 7:121-126. (In Russ.)
8. Faizullin A. A., Mamleev A.R. Teplonasosnaya ustanovka dlya utilizatsii teploty gorodskikh stochnykh vod. in: *sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh. 10–11 Dec 2019; Kursk, Russia*. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2019; 7. pp. 100-101. (In Russ.)
9. Yusupov R.D., Ziganshin S.G., Politova T.O., 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.)
10. Zapol'skaya I.N. Transfer of the hot water preparation function to the consumer by installation iwwh as a way to reduce heat consumption. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2021; 13; 3(51):146-155. (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. Novitskaya M. P. Teploobmennyy apparat dlya utilizatsii teploty stochnykh vod domokhozyaistva. *Komunal'na ta promislova energetika*. 2018; 40(1):56-60.
13. Ziwen L., Qingxu H., Chunyang H. 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. 164:105-113. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105113>
14. Sitzenfrei R., Hillebrand S., Rauch W. Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems. *Water Science and Technology*. 2017; 75; (5-6):1243-1250. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.598>
15. Feike F., Olmanns J., Dammel F. et al. Evaluation of the waste heat utilization from a hot-water-cooled high performance computer via a heat pump. *Energy reports*. 2021. (7):70-78. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.038>
16. 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>
17. 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; 128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
18. Ivanko D., Sorensen A.L., Nord N. Selecting the model and influencing variables for DHW heat use prediction in hotels in Norway. *Energy and Buildings*. 2020. 228. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110441>
19. Kunitskiy V. A., Lukin S.V. 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.)

20. 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>

#### **Authors of the publication**

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

**Vyacheslav A. Kunitskiy** – Vologda State University, globe@mail.ru.

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)*

**Получено** **25.12.2023 г.**

**Отредактировано** **19.02.2024 г.**

**Принято** **21.02.2023 г.**