

На правах рукописи

Куницкий

Куницкий Вячеслав Андреевич

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ СПОСОБ ЛОКАЛЬНОЙ УТИЛИЗАЦИИ
ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ТЕПЛООБМЕННОГО
АППАРАТА**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Вологда, 2025

Работа выполнена на кафедре теплогазоводоснабжения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вологодский государственный университет».

Научный руководитель – **Лукин Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики и теплотехники ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»

Официальные оппоненты: **Темлянцев Михаил Викторович** доктор технических наук, профессор, проректор по реализации стратегического проекта, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк
Лопатин Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой реактивных двигателей и энергетических установок ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», г. Архангельск.

Защита диссертации состоится 18 декабря 2025 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, svetlana-zag@bk.ru. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат диссертации разослан «_____» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Борисова Светлана Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Локальная утилизация теплоты сточных вод – это способ рекуперации тепловой энергии сточных вод, при котором полезное использование теплоты происходит в непосредственной близости к месту образования стоков. При данном способе рекуперации теплоты стоков используется теплообменный аппарат кожухотрубного типа, расположенный горизонтально или вертикально. В большинстве случаев данный теплообменный аппарат является устройством типа «труба в трубе». Устройство располагается в непосредственной близости к водоразборному прибору или группе приборов, образующих сточные воды, теплоту которых планируется полезно использовать для нагрева холодной воды.

Каждое водоразборное устройство имеет свои уникальные режимные особенности и условия эксплуатации, оказывающие влияние на эффект от локальной утилизации теплоты стоков. Также, утилизационный теплообменник существенную часть времени использования функционирует при нестационарном тепловом режиме. Именно поэтому при разработке энергосберегающего мероприятия на основе данного способа рекуперации необходимо в каждом конкретном случае определять рациональные характеристики теплообменного аппарата, соответствующие условиям эксплуатации водоразборного устройства.

Актуальность исследования основывается на:

- отсутствии данных о влиянии условий эксплуатации теплообменного аппарата исследуемой конструкции на эффективность утилизации теплоты стоков;
- отсутствии методики теплового расчета теплообменных аппаратов для локальной утилизации теплоты сточных вод, учитывающей условия эксплуатации теплообменника;
- отсутствии данных о потенциальном эффекте от локальной утилизации теплоты сточных вод, определённом с учетом условий эксплуатации теплообменника и особенностей его использования (использование при нестационарном тепловом режиме).

Данный способ утилизации теплоты сточных вод доступен для применения в системах горячего водоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий. Тема исследования соответствует государственной программе Российской Федерации «Развитие энергетики».

Степень разработанности темы исследования. Научные исследования по разработке способов использования теплоты хозяйствственно-бытовых сточных вод активно проводились отечественными и зарубежными учеными, такими как А.П. Бурцев, Н.С. Перепелица, А.К. Аксенов, А.А. Любинский, В.П. Дегтярева, Н.А. Цветков, Я.О. Морозов, Л.О. Яковлев, Т.Н. Ильина, Р.И. Юдин, Д.В. Выборнов, З.В. Удовиченко, Н.В. Долгов, В. И. Милкина, А. Е. Шульженко, С. В. Соболева, Н. В. Калитенков, А. В. Кобылкина, М. В. Кобылкина, Ю. О. Риккер, Ж. А. Гарсия Мелису, Е. А. Крюкова, М.П. Новицкая, А. Mazhar, S. Liu, A. Shukla, P. Jadwiszczak, E. Niemierka, B. Piotrowska, D. Sly's, S. Kordana-Obuch, M. Starzec, Anusha

Ravichandran, Nancy Diaz-Elsayed, Sylvia Thomas, Qiong Zhang, Ramin Manouchehri, Carsen J. Banister, Michael R. Collins, L.T. Wong, K.W. Mui, Y. Guan, Roman Vavricka, Jindrich Bohac, Tomas Matuska, Selcuk Selimli, Talha Karabas, Yunus Taskin, Mehmet Burak Karatas, Jose Fernandez-Seara, Carolina Pineiro-Pontevedra J. Alberto Dopazo, Shahmohammadi S., Steinmann Z., King H., Hendrickx H., Huijbregts M. A. J., и другие, труды которых посвящены изучению тепловых процессов в теплообменном оборудовании, использующимся для утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод, исследованию энергетического потенциала для рекуперации хозяйственно-бытовых стоков.

Целью диссертации является повышение эффективности систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты сточных вод; оценка эффекта от применения утилизационного теплообменного аппарата (ТОА) в сетях горячего водоснабжения; проведение теоретических и экспериментальных исследований для определения рациональных характеристик утилизационного ТОА.

Задачи диссертационного исследования:

1. анализ современного состояния исследований по теме локальной утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод и формализация актуальных проблем данного способа рекуперации тепловой энергии;
2. проведение конструктивного, теплового и поверочного расчёта утилизационного теплообменного аппарата;
3. разработка математической модели теплопередачи в теплообменном аппарате при стационарном и нестационарном режиме работы;
4. создание рабочего образца ТОА (экспериментальной установки);
5. валидация математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате на основе экспериментального испытания;
6. исследование влияния условий эксплуатации, геометрических и режимных параметров теплообменного аппарата на эффективность утилизации тепловой энергии хозяйственно-бытовых сточных вод;
7. разработка на основе полученных результатов исследования инженерной методики теплового расчета и проектирования теплообменного устройства с рациональными параметрами для утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод;
8. оценка эффективности и технико-экономическая оценка применения утилизационного ТОА с рациональными параметрами в рамках системы горячего водоснабжения отдельного объекта теплоснабжения.

Объект исследования – система горячего водоснабжения с интегрированными в ней теплообменными аппаратами, утилизирующими теплоту хозяйственно-бытовых сточных вод с целью предварительного нагрева холодной воды в системе водоснабжения.

Предмет исследования – зависимость количества полезно утилизированной тепловой энергии сточных вод, отводимых от конкретного водоразборного устройства, от условий эксплуатации, геометрических, теплофизических и режимных параметров ТОА.

Научная новизна работы:

- на основе математической модели теплопередачи в теплообменнике разработана методика теплового расчета теплообменного аппарата исследуемой конструкции для утилизации теплоты сточных вод при стационарных и нестационарных режимах работы;
- получены закономерности, описывающие влияние условий эксплуатации, геометрических, теплофизических и режимных параметров ТОА на количество полезно утилизированной тепловой энергии отдельным теплообменным устройством;
- получены экспериментальные данные по теплообмену в аппарате разработанной конструкции, а именно: распределение температуры в потоке нагреваемой среды во времени, определённое в расчетных пространственных точках; тепловая инерция теплообменного аппарата (количество времени, необходимое для достижения стационарного теплового режима устройством).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании расчетной методики для определения рациональных характеристик утилизационного ТОА, тепловой инерции устройства, энергетического, экономического и экологического эффекта от его применения. В основе методики лежит прошедшая процедуру валидации разработанная математическая модель теплопередачи в теплообменном аппарате, учитывающая период нестационарной и стационарной работы устройства.

Практической значимостью работы является:

- способ локальной утилизации теплоты сточных вод на основе использования утилизационного теплообменника оригинальной конструкции в непосредственной близости от места разбора горячей воды;
- программное обеспечение для расчета теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате;
- универсальная мобильная стеновая установка, применимая для определения мощности и тепловой инерции теплообменника, утилизирующего теплоту хозяйственно-бытовых сточных вод, в зависимости от режима работы водоразборного устройства, площади поверхности теплообмена, конфигурации теплообменника и условий эксплуатации;
- данные о количестве тепловой энергии, доступной для полезного использования путём рекуперации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод на основе использования утилизационного теплообменного аппарата;
- экономический и экологический эффект от использования ТОА для локальной утилизации теплоты сточных вод;
- рекомендации по выбору рациональных геометрических характеристик утилизационного ТОА;
- рациональная конструкция теплообменного аппарата для локальной утилизации теплоты сточных вод в непосредственной близости от места разбора горячей воды.

Методология и методы исследования определяются целью и задачами работы, сложившимися научными подходами и направлены на

совершенствование теплообменного оборудования для использования вторичных энергетических ресурсов в коммунальной энергетике. По существу, методология базируется на разработке расчетно-аналитического метода, основанного на достоверных и воспроизводимых данных о состоянии теплопередачи в теплообменнике, полученных с использованием стендовой установки, интегрированной в реальные сети горячего водоснабжения жилого многоквартирного здания. Также методологией служат теоретические положения по расчету теплообменных аппаратов; теория теплообмена; теоретические основы гидродинамики; теория математического моделирования тепловых процессов; методы планирования экспериментальных исследований.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается использованием базовых положений по расчету теплообменного оборудования, систем горячего водоснабжения зданий; удовлетворительной сходимостью экспериментальных данных, полученных на основе высокоточных измерительных приборов (имеющих действительное свидетельство о поверке), и теоретических результатов, полученных на основе математического моделирования теплопередачи в утилизационном теплообменнике.

Также, полученные экспериментальные данные подтверждают адекватность выбранной математической модели теплового расчета теплообменного аппарата исследуемой конструкции.

Положения, выносимые на защиту

1) способ реализации энергосберегающего мероприятия: локальной утилизации теплоты сточных вод на основе использования утилизационного теплообменника оригинальной конструкции в непосредственной близости от места разбора горячей воды;

2) закономерности, описывающие влияние условий эксплуатации, геометрических, теплофизических и режимных параметров ТОА на количество полезно утилизированной тепловой энергии отдельным теплообменным устройством;

3) разработанную на основе математической модели теплопередачи в теплообменнике методику теплового расчета теплообменного аппарата исследуемой конструкции для утилизации теплоты сточных вод при стационарных и нестационарных режимах работы;

4) экспериментальные данные по теплообмену в разработанном теплообменном аппарате.

Апробация работы и публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 25 работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 1 статья в научном издании, индексируемом в международной базе данных Scopus, 2 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на полезную модель. Отдельные разделы диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня: Международная

молодежная научная конференция Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация», Международная научная конференция «Молодые исследователи – регионам», г. Вологда (2019, 2020, 2021, 2023), Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», г. Казань (2019, 2022), Научно-техническая конференция студентов и аспирантов с международным участием «Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве», г. Ульяновск (2022), Международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования», г. Вологда (2019, 2020), Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых, г. Вологда (2019, 2020, 2021, 2023).

Получен акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс в Вологодском государственном университете. Также, на методику проектирования утилизационного теплообменника для локальной утилизации теплоты сточных вод получен акт о внедрении в проектную практику компании ООО «Северсталь-Проект».

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» по пунктам паспорта:

6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»;

10 – «Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды».

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации, в разработке математической модели теплопередачи в теплообменном устройстве, в самостоятельной разработке экспериментальной установки, проведении экспериментов, последующей обработке полученных эмпирических данных, в разработке методики проектирования теплообменного устройства с рациональными параметрами, в разработке рекомендаций по применению разработанного устройства для утилизации теплоты сточных вод, в оценке энергетического потенциала, доступного для полезной утилизации тепловой энергии сточных вод, в разработке полезной модели утилизационного теплообменного аппарата, в подготовке публикаций по теме исследования и выступлений на конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, шести приложений и содержит 158 страниц машинописного текста, включает 33 рисунка, 24 таблицы. Список литературы из 86 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость, перечислены положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе представлен обзор локальной утилизации теплоты сточных вод, как способа полезного использования хозяйственно-бытовых сточных вод в непосредственной близости к месту их образования (водоразборному устройству) при помощи теплообменного аппарата.

В данной работе рассматривается локальная утилизация теплоты сточных вод, образующихся в душевой.

Рассмотрены особенности данного способа утилизации тепловой энергии сточных вод, а именно: на эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод влияет множество факторов (длительность отдельного использования душевой, массовый расход воды в душевой, температура сред на входе в теплообменный аппарат, время, необходимое для достижения стационарного теплового режима теплообменным устройством, количество отдельных использований душевой в течение расчетного периода и другие); теплообменник рассматриваемой конструкции функционирует существенную часть времени при нестационарном тепловом режиме и его мощность (количество теплоты сообщаемое массовому расходу нагреваемой среды в единицу времени изменяется во времени); в каждом конкретном случае необходимо определять рациональные характеристики теплообменного аппарата на основе режимных особенностей водоразборного устройства.

Рассмотрен опыт отечественных и иностранных ученых в исследовании теплообменных аппаратов для локальной утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод. Выделены основные направления исследований, представленных в открытом доступе на данный момент. Установлено, что отсутствуют исследования посвященные разработке методики расчета теплообменных аппаратов для утилизации теплоты сточных вод в душевой, рассматривающей эффект от их использования с учетом условий эксплуатации, режима и особенностей работы теплообменника.

Во второй главе представлена разработанная математическая модель теплопередачи в утилизационном ТОА оригинальной конструкции, позволяющая определять распределение температуры внутри потока нагреваемой и греющей среды во времени и пространстве в зависимости от температуры теплоносителей на входе в ТОА, массового расхода теплоносителей, геометрических и теплотехнических параметров ТОА, режимных параметров водоразборного устройства и особенностей его работы. Математическое моделирование теплопередачи в ТОА выполнялось для теплообменника с наиболее часто встречающейся конструкцией у подобных устройств: рекуператор является кожухотрубным теплообменным аппаратом, состоящим из корпуса и пучка труб, расположенных внутри корпуса. Корпус является частью канализационной сети и в него попадает сточная горячая вода сразу после удаления из ванны или душевого поддона, а пучок труб,

расположенный в греющей воде, является частью сети холодного водоснабжения (рисунок 1).

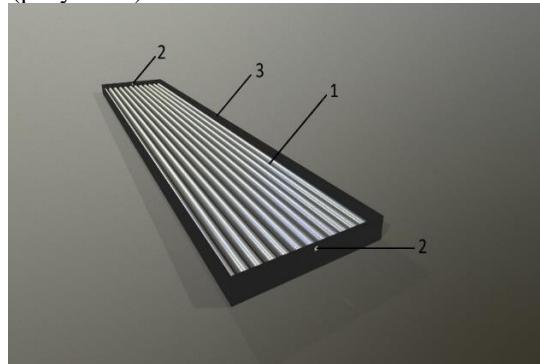


Рисунок 1. Изображение теплообменного аппарата, где 1 – трубы с нагреваемой водой; 2 – отверстия для подачи/удаления греющей среды в корпус ТОА; 3 – корпус ТОА.

Математическая модель теплопередачи в ТОА разработана для двух потоков греющей и нагреваемой среды, обменивающихся теплотой, с площадью поперечного сечения S_1 и S_2 соответственно (рисунок 2). Таким образом, моделируя распределение температур в двух взаимодействующих потоках, можно получить данные о теплопередаче в ТОА в целом.

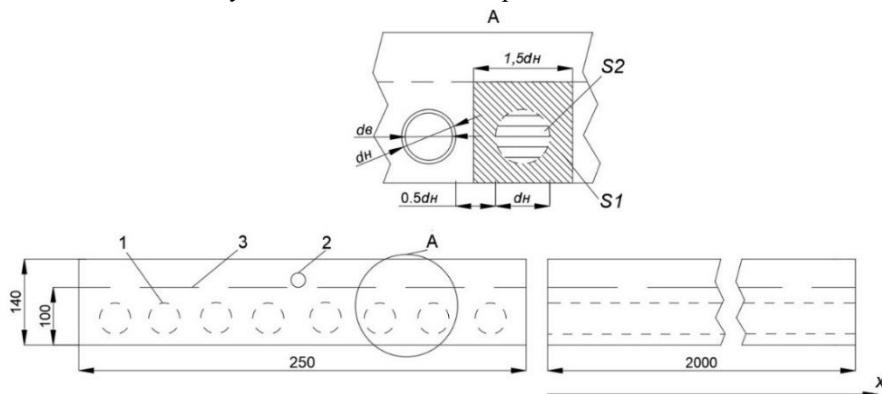


Рисунок 2. Схема устройства ТОА с параметрами для математического моделирования теплообмена между двумя потоками сред: 1 – стальная трубка с нагреваемой водой; 2 – отверстия для подачи/удаления греющей среды из корпуса ТОА; 3 – высотный уровень греющей воды внутри корпуса ТОА; $d_{\text{н}}$ и $d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметр трубы соответственно; S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения потока греющей и нагреваемой среды соответственно.

Средняя температура по сечению потока среды (температура смешения) изменяется по длине потока и зависит от времени, прошедшего после включения ТОА (с момента включения водоразборного устройства в

душевой). Функция средней температуры по поперечному сечению потока среды обозначена, как $t_1(x,t)$ и $t_2(x,t)$ для греющей и нагреваемой среды соответственно. В дальнейшем в тексте параметры, относящиеся к греющей среде, обозначаются индексом «1», а параметры нагреваемой среды обозначаются индексом «2». Движение потока нагреваемой среды совпадает с направлением пространственной оси x .

К математической модели применяется ряд упрощений и допущений, а именно:

- изменение температуры сред происходит только вдоль пространственной оси x и во времени t ;
- тепловой инерцией стенки трубы можно пренебречь (в любой момент времени теплообмена количество теплоты, переданное от греющей среды, равно количеству теплоты, полученному нагреваемой средой);
- при расчете используются постоянные значения теплотехнических характеристик (средние арифметические значения для рассматриваемого диапазона температур 5-50 °C), так как получаемые при таком подходе результаты распределения температуры в потоках практически не отличаются от получаемых результатов при моделировании с теплотехническими характеристиками-функциями от температуры (относительная разница составила 3%).

Математическая модель строится на основе известного общего уравнения энергии и неразрывности, справедливого для каналов любого поперечного сечения, постоянного по длине. На основе записанных уравнений для потока нагреваемой и греющей среды составляется система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_2}{\partial \tau} + w_{2x} \frac{\partial t_2}{\partial x} &= \frac{k(t_1 - t_2)\pi d}{c\rho S_2} = \frac{4k(t_1 - t_2)}{c\rho d}; \\ \frac{\partial t_1}{\partial \tau} - w_{1x} \frac{\partial t_1}{\partial x} &= -\frac{\pi dk(t_1 - t_2)}{c\rho S_1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $S_1 = h \cdot a \cdot (\pi \cdot d_{\text{н}}^2 / 4)$ – площадь поперечного сечения потока греющей воды, м²; $S_2 = (\pi \cdot d_{\text{вн}}^2 / 4)$ – площадь поперечного сечения потока нагреваемой воды, м²; $d_{\text{н}}$ и $d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметр трубы соответственно, м; d – диаметр трубы с нагреваемой средой, определяемый по формуле $d = (d_{\text{вн}} + d_{\text{н}})/2$, м; a – расстояние между осями двух соседних труб, м; h – высотный уровень греющей воды внутри корпуса ТОА, м; c – изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); w_{1x} и w_{2x} – средние по сечению потоков скорости сред, м/с; t_1 и t_2 – средние по сечению потоков температуры сред, °C; $k = 1/(1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2)$ – средний коэффициент теплопередачи по поверхности теплообмена, Вт/(м²·К); α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи греющей и нагреваемой среды соответственно, Вт/(м²·К); ρ – плотность жидкости, кг/м³; t_{1x} – температура одномерного потока греющей среды в координате x , °C; t_{2x} – температура одномерного потока нагреваемой среды в координате x , °C.

Коэффициент теплопередачи k определяется на основе значений коэффициентов теплоотдачи греющей и нагреваемой среды по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи греющей и нагреваемой среды соответственно, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности материала труб, Вт/(м·К); δ – толщина стенки трубы с нагреваемой средой, м.

Коэффициент теплоотдачи греющей среды α_1 (сточной воды, находящейся в межтрубном пространстве внутри ТОА) определяется для случая свободной и вынужденной конвекции. Наибольшее из полученных значений коэффициента принимается для использования при математическом моделировании.

Для определения коэффициента теплоотдачи греющей среды при свободной конвекции около горизонтальной пластины используется формула:

$$\bar{N}u_d = 0,5 \cdot (Gr_d Pr_{ж1})^{0,25}, \quad (3)$$

где $Nu_d = \alpha_1 \cdot d / \lambda$; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля.

Для определения коэффициента теплоотдачи при вынужденной (искусственной) конвекции в случае омывания потоком жидкости горизонтальной пластины используется формула:

$$\bar{N}u_l = 0,66 Re^{0,5} \cdot Pr_{ж1}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{ж1}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где Re – число Рейнольдса, определенное для движения греющей жидкости в межтрубном пространстве; $Pr_{ж1}$ и Pr_c – число Прандтля, определенное для средней температуры греющей жидкости в межтрубном пространстве и температуры наружной поверхности стенки трубы соответственно.

Результатом совместного решения системы уравнений (2) является распределение температур внутри потоков сред во времени.

После долгого неиспользования ТОА температура сред внутри корпуса и труб будет равна температуре воздуха в помещении, в котором устройство располагается. Предполагается монтаж устройства в непосредственной близости от водоразборного устройства, поэтому для данного расчета температура сред в начальный момент времени принимается равной температуре воздуха в ванной комнате $t_0 \approx 20$ °С. Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1(x, \tau) \Big|_{\tau=0} &= t_0; \\ t_2(x, \tau) \Big|_{\tau=0} &= t_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Границные условия в контексте данной задачи имеют физический смысл температуры нагреваемой и греющей воды, поступающей в ТОА. Значения температуры нагреваемой и греющей среды зависят от времени года

и от температуры удаляемой воды из душа соответственно. Границные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1(x, \tau) \Big|_{x=l; \tau>0} &= t_r; \\ t_2(x, \tau) \Big|_{x=0; \tau>0} &= t_x, \end{aligned} \quad (6)$$

где t_r – температура греющей среды, поступающей в ТОА (≈ 40 °C); t_x – температура нагреваемой среды, поступающей в ТОА (5...15 °C); L – длина стальной трубы внутри ТОА, м.

Система уравнений (1) в работе решалась методом конечных разностей на основе ПО Mathcad.

Результат численного решения системы уравнений (1) для потока нагреваемой среды представлен на рисунке 3.

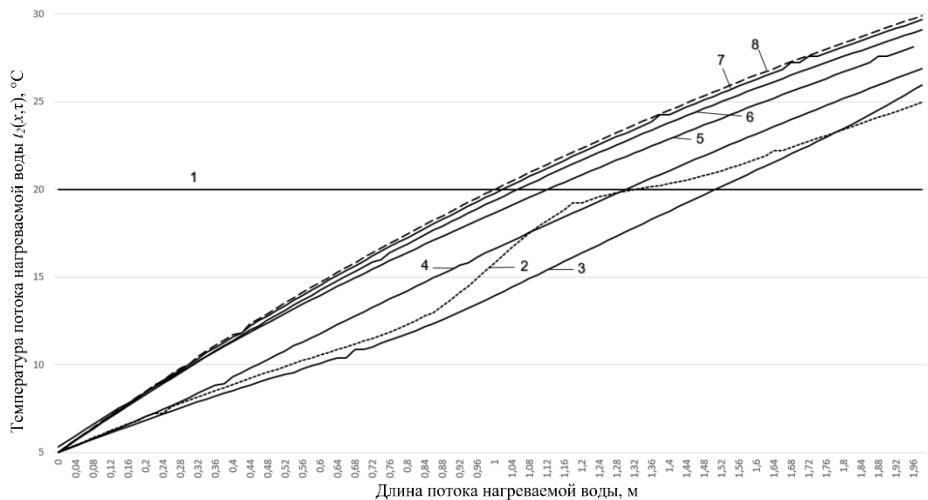


Рисунок 3. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТОА, где 1 – $\tau = 0$ с; 2 – $\tau = 60$ с; 3 – $\tau = 120$ с; 4 – $\tau = 180$ с; 5 – $\tau = 240$ с; 6 – $\tau = 300$ с; 7 – $\tau = 420$ с; 8 – $\tau = 840$ с.

Анализ графика распределения температуры, представленный на рисунке 3, показал, что математическая модель корректно описывает физический процесс теплообмена теплопередачей между двумя движущимися потоками теплоносителей с качественной точки зрения: температура во всех точках потока нагреваемой среды увеличивается во времени и пространстве до достижения теплообменником стационарного теплового режима работы, наступающего в период от $\tau = 240$ до $\tau = 300$ секунд.

В главе 3 приводятся результаты исследования, проведенные на экспериментальной установке «Утилизационный теплообменник» (рисунок 4).

При проведении экспериментального испытания использовались средства измерения (термометр контактный ТК-5.01С со сменным зондом

ЗПГУ8.1000 и установка поверочная переносная ВПУ-Энерго-М), имеющие действительные акты о поверке.

Результатом экспериментального испытания являются значения температуры в пространственных точках нагреваемого потока в разные моменты времени после начала работы ТОА.

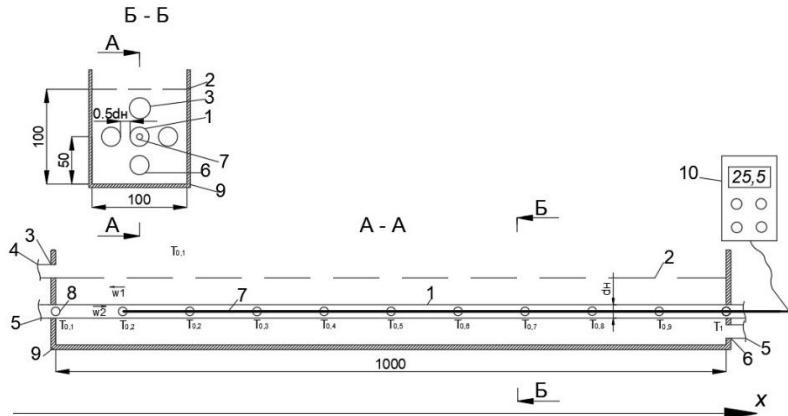


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки: 1 – гофрированная трубка из нержавеющей стали с холодной (нагреваемой) водой; 2 – высотный уровень греющей среды внутри корпуса ТОА; 3 – отверстие для удаления греющей воды из корпуса ТОА; 4 – сети водоотведения многоквартирного жилого дома; 5 – сети водоснабжения многоквартирного жилого дома, при помощи которых моделируются потоки греющей и нагреваемой среды; 6 – отверстие для подачи горячей (греющей) воды в межтрубное пространство ТОА; 7 – зонд контактного цифрового термометра длиной один метр; 8 – пространственные точки измерения температуры потока холодной (нагреваемой) воды; 9 – корпус ТОА; 10 – корпус электронного блока контактного цифрового термометра с дисплеем и кнопками управления; w_1 и w_2 – скорости греющей и нагреваемой среды соответственно.

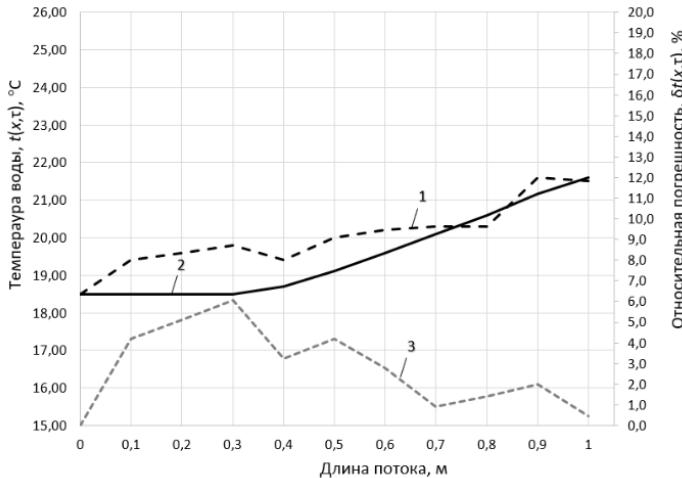


Рисунок 5. Распределение температуры нагреваемой воды, определённое при $\tau = 60$ с; 1 – опыт; 2 – расчет; 3 – относительная погрешность между опытными и расчетными данными, %.

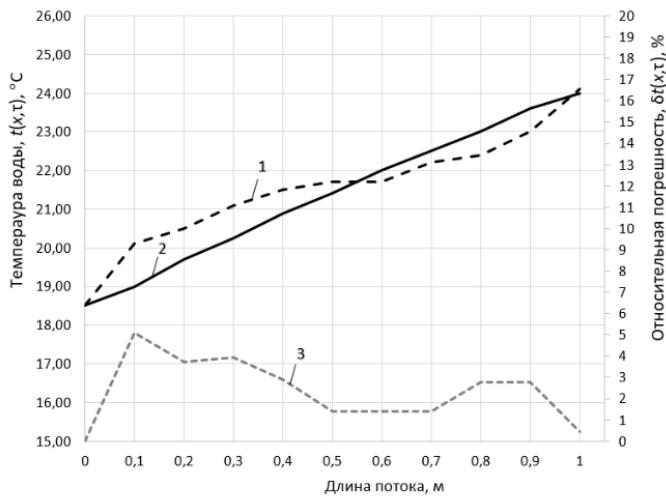


Рисунок 6. Распределение температуры нагреваемой воды, определённое при $\tau = 180$ с; 1 – опыт; 2 – расчет; 3 – относительная погрешность между опытными и расчетными данными, %.

На основе полученных опытных данных о распределении температуры внутри потока нагреваемой среды во времени определена мощность теплообменного аппарата в разные моменты времени τ (рисунок 7).

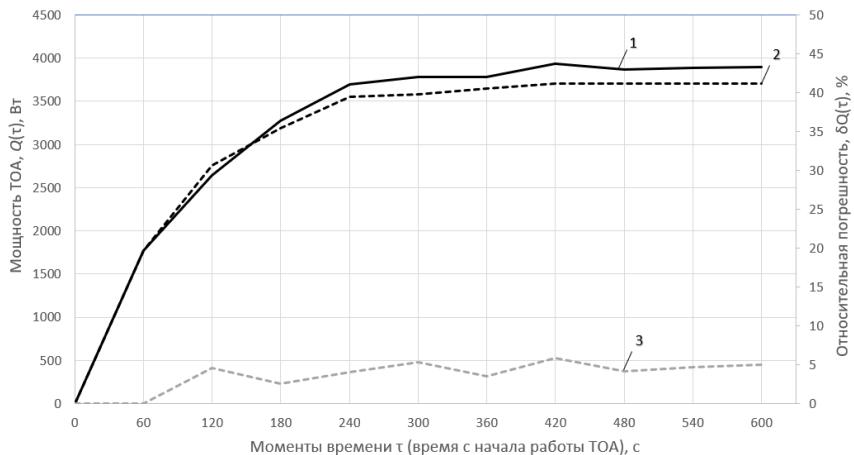


Рисунок 7. Зависимость мощности теплообменного аппарата от времени; 1 – опыт; 2 – расчет; 3 – относительная погрешность между опытными и расчетными данными, %.

Исследования, проведенные на экспериментальной установке «Исследование теплопередачи в утилизационном теплообменнике», позволили произвести валидацию нестационарной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата. Критерием проверки выступило распределение температуры внутри потока нагреваемой среды, определённое на основе математического моделирования и экспериментального испытания. При заданных условиях максимальное относительное расхождение значений температуры $\delta t(x,t) = 6\%$ (рисунок 5) вызвано, вероятно, сложностью описания реального процесса перемещения греющей воды в межтрубном пространстве для определения коэффициента теплоотдачи греющей воды.

Также, распределение температуры в потоках сред при достижении стационарного теплового режима, полученное на основе математической модели, с достаточной точностью для инженерных расчетов сходится с распределением температуры, определенным аналитически по известным формулам для расчета теплообменников при стационарном тепловом режиме.

Мощность теплообменного аппарата, определённая в ходе экспериментального испытания, больше значения мощности, определённого при математическом моделировании. Максимальное расхождение составило $\delta Q(t) = 5\%$ (рисунок 7). Среднее расхождение в течение первых 10 минут после включения составило 3,5 %.

В главе 4 на основе математической модели теплопередачи в утилизационном TOA исследовано влияние геометрических параметров (диаметр труб с нагреваемой водой d , расстояние между двумя соседними трубками в пучке, длины потоков греющей и нагреваемой среды L , количества труб с нагреваемой водой N), режимных параметров (массовый расход и температура нагреваемой воды на входе в TOA, время работы TOA), теплофизических характеристик (коэффициент теплопроводности материала

труб с нагреваемой водой) на эффективность утилизации теплоты теплообменным аппаратом.

Вопрос очистки теплообменной поверхности в данной работе предлагается решать своевременным удалением отложений, поэтому влияние данного фактора не учитывается.

Для исследования влияния определялись характеристики теплообменного аппарата: абсолютное количество полезно утилизированной тепловой энергии в рамках отдельного использования душевой, тепловая инерция теплообменника, относительная экономия тепловой энергии для разового использования душевой, удельное количество утилизированной тепловой энергии q , Дж/м².

Абсолютное количество полезно утилизированной тепловой энергии в рамках отдельного использования душевой определялось по формуле:

$$B = \int_0^{420} Q(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где $Q(\tau)$ – мощность ТОА в момент времени τ , Вт.

Относительная экономия тепловой энергии в рамках отдельного использования душевой определялась, как $\varphi = (B/E) \cdot 100\%$, где E – количество тепловой энергии, необходимое для разового использования душевой без использования локальной утилизации теплоты стоков. Удельное количество утилизированной тепловой энергии определяется, как отношение отобранный тепловой энергии у сточных вод к площади поверхности теплообмена $q = B/F$.

В ходе исследования параметров, влияющих на эффективность утилизации теплоты сточных вод, был сформирован список параметров, оказывающих существенное влияние на эффективность утилизации теплоты стоков, а именно: массовый расход теплоносителей в ТОА; длительность отдельного использования душевой; количество отдельных использований душевой за расчетный период; длина труб с нагреваемой средой.

В качестве примера данные для исследования степени влияния параметра на эффективность утилизации теплоты сточных вод приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Тепловые характеристики ТОА

Массовый расход сред теплоносителей, G , кг/с	Тепловая инерция, Δt , с	Необходимое количество теплоты, E , кДж	Количество полезно утилизированной теплоты, B , кДж	Экономия теплоты, φ , %
0,1	360	4431	1870	42
0,12	325	5317	1982	37
0,14	300	6203	2067	33
0,16	290	7090	2135	30
0,18	260	7976	2189	27

Из данных, представленных в таблице 1 видно, что чем большее значение массового расхода обеих сред в теплообменном аппарате, тем ниже относительная экономия тепловой энергии и тепловая инерция теплообменника. На основе анализа представленных данных был сделан

вывод о том, что массовый расход сред оказывает существенное влияние на эффективность утилизации теплоты.

При исследовании влияния такого параметра условий эксплуатации ТОА, как температура потоков сред в момент начала работы душевой (температура внутреннего воздуха в помещении, в котором располагается ТОА), сделан вывод, что варьирование данной температуры не оказывает существенного влияния на эффективность утилизации теплоты стоков: при $t(x,0) = 18^{\circ}\text{C}$ относительная экономия тепловой энергии для разового использования душевой составила $\varphi = 32\%$, а при $t(x,0) = 28^{\circ}\text{C}$ экономия составила $\varphi = 38\%$.

По всем вышеприведенным параметрам условий эксплуатации и режимных особенностей работы водоразборного устройства был проведен подобный анализ.

В главе 5 предложен алгоритм инженерной расчетной методики проектирования теплообменного аппарата для локальной утилизации сточных вод, образующихся в душевой, который предполагает подбор более рациональных геометрических и тепловых параметров теплообменника в зависимости от условий его эксплуатации и режимных особенностей работы водоразборного устройства. Алгоритм имеет следующее содержание:

1. Определение доступных средств для реализации энергосберегающего мероприятия. Определение доступного физического пространства для размещения утилизационного ТОА. Задание требуемого срока окупаемости энергосберегающего мероприятия (требуемого энергетического или экологического эффекта).

2. Определение расчетных геометрических параметров ТОА, режимных параметров, условий эксплуатации водоразборного устройства и задание температур греющей и нагреваемой среды на выходе из ТОА.

При проектировании теплообменника для локальной утилизации теплоты сточных вод необходимо иметь конкретные данные по условиям эксплуатации, оказывающим существенное влияние на эффективность утилизации теплоты стоков (которые были определены в главе 4 диссертации), прочие параметры при невозможности получения в их отношении точных данных предлагается взять из нормативной или справочной литературы.

3. Определение расчетных капитальных затрат на проведение энергосберегающего мероприятия.

4. Определение среднего коэффициента теплопередачи между греющей и нагреваемой средой через стенку труб в ТОА вдоль теплообменной поверхности.

5. Определение гидравлического сопротивления теплообменного аппарата с выбранными геометрическими характеристиками.

6. Математическое моделирование теплопередачи в утилизационном ТОА.

7. Определение потенциального энергетического и экологического эффекта за расчетный период.

8. Определение расчетного срока окупаемости энергосберегающего мероприятия (экономического эффекта).

На основе данных о капитальных затратах и энергетическом эффекте за расчетный период (п.3 и п.7 алгоритма методики расчета) определяется срок окупаемости энергосберегающего мероприятия.

9. Сравнение расчетного срока окупаемости, энергетического и экологического эффекта с требуемыми показателями результата, указанного в п.1 (при их наличии).

10. Если сравнение в п.9 показало, что расчетные показатели результата не удовлетворяют требуемым показателям, то рекомендуется уменьшить расстояние между соседними трубками с нагреваемой средой и повторить расчет, начиная с п.2.

Данное действие приведет к увеличению расчетной площади теплообменной поверхности и увеличению абсолютного значения экономии тепловой энергии.

11. Если сравнение в п.8 показало, что расчетные показатели результата удовлетворяют требуемым показателям, то рекомендуется уменьшить расчетную длину труб с нагреваемой средой и повторить расчет, начиная с п.2.

12. После варьирования геометрических параметров ТОА, анализируя полученный результат расчета, производится решение о принятии полученных в ходе математического моделирования параметров ТОА рациональными.

Расчет, выполненный согласно представленной методике, показывает, что для санузла в жилом многоквартирном доме с децентрализованной системой ГВС (источником тепловой энергии является проточный газовый или электрический водонагреватель) возможно экономить $\varphi \approx 43\%$ тепловой энергии, необходимой для работы душевой, а при централизованной системе ГВС экономия тепловой энергии при тех же условиях эксплуатации составляет $\varphi \approx 25\%$ тепловой энергии.

На основе имеющихся данных о потреблении тепловой энергии в многоквартирных домах в г. Москве был определен потенциальный эффект от внедрения локальной утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод в многоквартирном доме, рассчитанном на 100 квартир.

Абсолютная экономия тепловой энергии для такого многоквартирного дома составила 64 Гкал и 37 Гкал для здания с децентрализованной и централизованной системой горячего водоснабжения. Относительное снижение потребляемой тепловой энергии жилым зданием в год составило 5% и 3,1% для децентрализованной и централизованной системы горячего водоснабжения соответственно.

Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия, реализуемого в данном многоквартирном доме, составил: 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.

Определена экономия топлива для жилого здания с заданными параметрами: 9,9 т.у.т. и 5,5 т.у.т. для жилого здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС соответственно. Данные значения экономии

топлива соответствуют экономии природного газа в размере: 8230 м³ и 4760 м³ соответственно.

Определено количество СО₂-эквивалента для сэкономленного количества топлива. При использовании природного газа количество СО₂-эквивалента составит 14,7 т СО₂-эквивалента для здания с децентрализованной системой ГВС и 8,5 т СО₂-эквивалента для здания с централизованной системой ГВС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы были решены все поставленные задачи:

1. Определены факторы, обуславливающие актуальность локальной утилизации теплоты сточных вод на основе рекуперативного теплообменного аппарата (ТОА). Приведены особенности, которые необходимо учитывать при данном способе рекуперации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод.

2. В ходе анализа существующих работ по теме утилизации теплоты сточных вод на основе локальной утилизации в непосредственной близости к водоразборному устройству выявлено, что в них отсутствует методика расчета утилизационного теплообменного аппарата, учитывающая условия эксплуатации теплообменника и особенности режима работы водоразборного устройства.

3. Разработана математическая модель процесса теплопередачи между потоком нагреваемой среды, движущимся внутри труб в теплообменнике, и потоком греющей среды (сточной воды), движущимся внутри корпуса теплообменника, учитывающая условия эксплуатации ТОА и режимные особенности водоразборного устройства.

4. Проведена процедура валидации разработанной математической модели на основе экспериментального испытания.

5. На основе математической модели исследовано влияние геометрических, режимных, теплофизических параметров на характеристики теплообменного аппарата; исследовано влияние условий эксплуатации теплообменника; даны рекомендации по рациональным геометрическим, теплофизическими и режимным параметрам работы утилизационного ТОА.

6. На основе проведенных исследований разработана инженерная методика, позволяющая определять характеристики утилизационного ТОА, количество полезно утилизированной тепловой энергии, тепловую инерцию устройства, относительную экономию тепловой энергии (для реализации методики составлен алгоритм).

7. Выполнен расчет энергетического и экологического эффекта от реализации локальной утилизации теплоты сточных вод, отводимых от душевой, получаемый в рамках отдельного водоразборного устройства с заданными режимными параметрами и условиями эксплуатации.

8. Проведена технико-экономическая оценка применения утилизационного ТОА с рациональными параметрами в рамках системы ГВС отдельного объекта теплоснабжения.

Результаты работы приняты к внедрению в компании ООО «Северсталь-Проект» и внедрены в учебный процесс в Вологодском государственном университете. Полученные в диссертации данные о потенциальном эффекте от локальной утилизации теплоты сточных могут применяться при исследовании и проектировании энергосберегающих мероприятий на основе утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

из перечня рецензируемых научных изданий, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации:

1. Куницкий, В.А. Характеристики теплообменника для локальной утилизации теплоты сточных вод при различных условиях эксплуатации / В.А. Куницкий, С.В. Лукин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26. – № 2. – С. 176–186.

2. Куницкий, В.А., Лукин С.В. Определение эффективности локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата / В.А. Куницкий, С.В. Лукин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26 – № 4. – С. 136–149.

из перечня рецензируемых научных изданий, входящих в перечень ВАК:

3. Куницкий, В. А. Исследование нестационарных режимов работы утилизационного теплообменного устройства на основе математического моделирования / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14 – № 4(56). – С. 69–79.

4. Куницкий В. А., Верификация нестационарной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата на основе экспериментального испытания / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15 – № 3(59). – С. 57–69.

в периодических научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных SCOPUS:

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.

публикации в других изданиях и материалах конференций:

6. **Куницкий, В. А.** Совершенствование математической модели тепловой работы утилизационного теплообменника / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Школа практических инноваций - инженерному бизнесу региона : Материалы Всероссийской научно-практической конференции памяти профессора Александра Николаевича Шичкова, Вологда, 19 января 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2024. – С. 106–108.
7. **Куницкий, В. А.** Особенности работы теплообменного аппарата для утилизации теплоты сточных вод / В. А. Куницкий // Развитие строительной отрасли: Сборник материалов II Межрегиональной конференции, Вологда, 21–24 сентября 2023 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2024. – С. 59–61.
8. **Куницкий, В. А.** О совершенствовании нестационарной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата / В. А. Куницкий // Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 17 ноября 2022 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. – С. 304–307.
9. **Куницкий, В. А.** Исследование влияния характеристик утилизационного теплообменника на его энергетическую эффективность / В. А. Куницкий // XVII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всероссийской научной конференции, Вологда, 20–24 ноября 2023 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. – С. 60–62.
10. **Куницкий, В. А.** Этапы разработки методики проектирования утилизационного теплообменного аппарата / В. А. Куницкий // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VIII Национальной научно-практической конференции, Казань, 08–09 декабря 2022 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 977–978.
11. **Куницкий, В. А.** О допущениях при разработке математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата / В. А. Куницкий // XVI Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: Материалы Всероссийской научной конференции. В 3-х томах, Вологда, 29 ноября 2022 года / Главный редактор М.М. Караганова. Том 1. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. – С. 357–359.
12. **Куницкий, В. А.** Особенности модернизации сетей горячего водоснабжения на основе утилизации теплоты сточной воды, образующейся в душе / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллаязнова Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 410–413.

13. Лукин, С. В. Анализ влияющих факторов на подбор теплообменного аппарата, утилизирующего теплоту сточных вод / С. В. Лукин, **В. А. Куницкий** // Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве: Сборник научных трудов II научно-технической конференции студентов и аспирантов с международным участием, Ульяновск, 30 сентября 2022 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2022. – С. 76–80.
14. Лукин, С. В. Разработка способа высокоеффективного горячего водоснабжения с помощью утилизации теплоты канализационных вод / С. В. Лукин, **В. А. Куницкий** // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XV Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2020 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 145–148.
15. **Куницкий, В. А.** Разработка энергоэффективного способа горячего водоснабжения в многоквартирных домах / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Актуальные вопросы развития строительной отрасли: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 12 ноября 2020 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 99–102.
16. **Куницкий, В. А.** Анализ результатов математического моделирования тепловой работы теплообменного аппарата / В. А. Куницкий // XV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всероссийской научной конференции, Вологда, 23 ноября 2021 года. Том 1. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 198–200.
17. **Куницкий, В. А.** Математическое моделирование нестационарного теплообмена в теплообменном аппарате / В. А. Куницкий // Молодые исследователи – регионам: Материалы Международной научной конференции. В 3-х томах, Вологда, 20–21 апреля 2021 года / Главный редактор С.Ф. Митенева. Том 1. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 327–328.
18. **Куницкий, В. А.** Способ экономии электрической энергии, потребляемой водонагревателем, при помощи теплообменного аппарата / В. А. Куницкий // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIV Международной научно-технической конференции, Вологда, 10 декабря 2019 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. – С. 198–203.
19. **Куницкий, В. А.** Способ горячего водоснабжения с утилизацией теплоты канализационной воды / В. А. Куницкий // Молодые исследователи – регионам: Материалы Международной научной конференции. В 3-х томах, Вологда, 13–23 апреля 2020 года / Главный редактор В.Н. Маковеев. Том 1. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. – С. 395–396.
20. **Куницкий, В. А.** разработка высокоеффективного способа горячего водоснабжения / В. А. Куницкий // XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всероссийской научной конференции: в 3 т.,

Вологда, 24–27 ноября 2020 года. Том Т. 1. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. – С. 303–305.

21. **Куницкий, В. А.** Использование теплообменного аппарата для рекуперации тепловой энергии сточной душевой воды / В. А. Куницкий // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2020. – № 1(7). – С. 19–22.

22. **Куницкий, В. А.** Способ горячего водоснабжения с утилизацией теплоты канализационной воды / В. А. Куницкий // XIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы межрегиональной научной конференции: в 2 томах, Вологда, 18–22 ноября 2019 года. Том 1. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2019. – С. 370–373.

23. **Куницкий, В. А.** Способ децентрализованного горячего водоснабжения с утилизацией теплоты воды, сливаемой из душевых устройств / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 4(6). – С. 54–57.

из объектов интеллектуальной собственности:

24. **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 24 сентября 2025.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668810 Российской Федерации. Программа моделирования распределения температур внутри потоков нагреваемой и греющей сред в утилизационном теплообменном аппарате при стационарном и нестационарном тепловом режиме: № 2023667714: заявл. 28.08.2023: опубл. 04.09.2023 / В. А. Куницкий, С. В. Лукин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет».

Подписано в печать 13.10.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. _____. Тираж 100. Заказ № _____.

Отпечатано с готового оригинал-макета в салоне оперативной полиграфии «Стройпечать» (ООО «Социум») 160009, г. Вологда, ул. Кирова, д. 21, тел.: 8 (911) 501-18-68, e-mail: stroiprint@yandex.ru