

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 621.181.27:721

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.5

Разработка эффективного водогрейного котла-утилизатора

Адхам Иминжанович Гиясов

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблемы утилизации тепла отходящего газа актуальны при производстве. Тепловые вторичные энергетические ресурсы — наиболее распространенный вид энергетических отходов. Эффективная утилизация тепловых выбросов позволит уменьшить расходы на энергоносители. Здание лепешечной, в которой применено техническое устройство водогрейного котла-утилизатора (ВКУ), — распространенный вид производственного здания в восточных странах, в котором горячее водоснабжение и отопление может осуществляться за счет использования утилизированного тепла, отходящего при работе групп печей-тандыров. Цель исследования — изучение процесса конвективного нестационарного течения потока тепла, протекающего по трубе теплообменника тандыров, и на его основе разработка несложной по устройству, малогабаритной, простой в изготовлении, экономичной и безопасной модели водонагревательного устройства для нужд народного хозяйства.

Материалы и методы. В основу исследования положена комплексная методология изучения, анализа и обобщения теплофизических процессов на базе конвективного нестационарного течения потока тепла, протекающего по трубе теплообменника печей-тандыров.

Результаты. Научно-технический результат, заключающийся в повышении тепловой эффективности ВКУ, сконструированного в здании лепешечной, обеспечивается за счет эффекта нагрева, аккумуляции и теплоотдачи вертикальных оребренных стальных нагревательных теплоемких труб теплообменников, помещенных в цилиндрический котел, при конвективном нагреве их отводящим газовым теплоносителем без возврата тепла в водогрейный котел.

Выводы. Разработан проект здания лепешечной с научно и практически обоснованной сконструированной ВКУ группой тандыров, представляющей собой вертикальную цилиндрическую емкость, заполненную водой, внутри которой помещены отводящие вертикальные теплообменные трубы, проходя через них, тепло, выделяемое при функционировании тандыров-печей в процессе выпечки хлеба-лепешки возгоранием дров, угля, природного газа или электронагревателей, нагревает воду секций котла, которая служит для горячего водоснабжения потребителей и отопления помещений здания. Установлено, что метод оребрения труб расширяет область применения устройства, дополнительно повышая коэффициент теплоемкости и теплообмена, и производительность оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водогрейный котел, утилизация, здание, оребрение труб, водоснабжение, отопление, теплообменник, конвекция

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды Национального исследовательского Московского государственного строительного университета «Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий» в аспекте «Тепловая безопасность в изменении климата» проблемы «Биосферная совместимость».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гиясов А.И. Разработка эффективного водогрейного котла-утилизатора // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 3. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.5

Автор, ответственный за переписку: Адхам Иминжанович Гиясов, GiyasovAI@mgsu.ru, adham52@mail.ru.

Development of an efficient water-heating waste heat boiler

Adham I. Giyazov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Problems of waste gas heat recovery are relevant in the course production activities. Secondary thermal energy resources are the most widely spread type of energy waste. Efficient recovery of waste heat will reduce energy costs. The building of a cafeteria, that has a water-heating waste heat boiler (WHB) represents a widely spread type of industrial

buildings in eastern countries, where hot water and heating can be provided by using heat waste recovered from groups of tandoor furnaces. The purpose of the research is to study unsteady convective flows of heat passing through the pipe of a tandoor heat exchanger and to develop a simple design of a small-sized, easy to manufacture, economical and safe model of a water heating device for the needs of the national economy.

Materials and methods. The research is based on a comprehensive methodology employed to study, analyze and generalize thermophysical processes based on the study of convective unsteady heat flows in heat exchanger pipes of tandoor furnaces.

Results. The research result represents higher thermal efficiency of the WHB installed in the building of a cafeteria due to the heating, accumulation and heat transfer by vertical finned steel heat-exchanger pipes in the cylindrical boiler in the course of convective heating by the outlet gas used as the heat carrier without returning heat to the water heating boiler.

Conclusions. The cafeteria building has scientifically and practically grounded design of a WHB tandoor group, which is a vertical cylindrical tank filled with water, in which vertical outlet heat exchange pipes are placed. Heat, emitted during the operation of tandoors, is used to bake flatbreads and bread by burning wood, coal, natural gas or electric heaters. This heat heats boiler sections to supply hot water to consumers and heat the building premises. The method of finned pipes extends the field of application of the device, increasing the coefficient of heat capacity and heat exchange, as well as the capacity of equipment.

KEYWORDS: hot water boiler, recovery, building, finned pipes, water supply, heating, heat exchanger, convection

Acknowledgements. The work was carried out in accordance with the research work plan of the Department of Architecture and Construction Design and Environmental Physics of the National Research Moscow State University of Civil Engineering "Function, Structure, Environment in the Architecture of Buildings" in the field of "Thermal Safety in Climate Change" of "Biosphere Compatibility".

FOR CITATION: Giyazov A.I. Development of an efficient water-heating waste heat boiler. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(3):5. URL: <http://ns-o-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.5

Corresponding author: Adham I. Giyazov, GiyasovAI@mgsu.ru, adham52@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые вторичные энергетические ресурсы — наиболее распространенный вид энергетических отходов. Одним из возможных путей снижения расходов на энергоносители является утилизация тепловых выбросов. Кроме того, и на производстве актуальна проблема утилизации тепла отходящих газов.

Модель устройства водогрейного котла-утилизатора (ВКУ) относится к области строительства, горячего водоснабжения и теплоснабжения. Система утилизации тепла используется с целью понижения до минимума расхода энергии для горячего водоснабжения и отопления зданий путем использования ВКУ.

Заложенный подход утилизации теплоты продуктов сгорания в предлагаемой модели ВКУ имеет широкое применение для пополнения производственных и бытовых нужд в энергии, может быть использован также при эксплуатации теплогенераторов с подобными конструктивными характеристиками при проектировании зданий различного назначения.

Во многих восточных странах с национальными традиционными особенностями, практикуемыми в настоящее время в мировой практике, при большой численности населения принято организовывать центры (лепешечные) по приготовлению и выпечке хлеба, в которых для обеспечения непрерывности технологического процесса сосредотачивается группа печей-тандыров, функционирующих одновременно и регулярно в зависимости от потребности населения в продуктах.

Традиционный вид здания лепешечной представляет собой объемное надземное строительное

сооружение, включающее помещения для размещения печей-тандыров, предназначенных для выпечки хлеба-лепешки.

Тандыр — объемная печь для выпечки одновременно большого количества лепешек, работающая непрерывно и выделяющая тепло от возгорания твердого топлива (уголь, дрова) или природного газа, электроэнергии, выбрасываемого в атмосферу через теплогазоходные трубы. Источниками экономии энергоресурсов служит использование тепла дымовых газов, тепла горячих потоков от твердого топлива, угля и дров, газа, отходящих с печей-тандыров безвозвратно.

Тандыр настолько многогранен, что в нем одинаково вкусно получается поджарка мяса, рыба, овощи, грибы и даже выпечка.

Здание лепешечной является наиболее распространенным видом производственного здания, в котором сосредотачивается группа печей-тандыров для выпечки лепешек, и источником возобновляемых энергетических ресурсов, в котором горячее водоснабжение и отопление могут осуществляться за счет применения утилизированного тепла, уходящего в атмосферу через трубы тепла и охлаждения дымовых газов от непрерывной работы тандыров.

Эффективность тепла в оборудовании ВКУ для групп источников тепловыделения достаточно велика. Водогрейный котел, утилизирующий тепло, приемлем также и для точечных источников тепловыделения. Продукт выхлопа печей — горячий конвективный газ, при рациональном использовании которого достигается технический и практический результат.

Исследованию стационарных ламинарных и турбулентных режимов конвективного течения газов в вертикальном круглом канале при линейно

изменяющейся температуре конвективного потока и стенки посвящены работы [1–4].

Принципам расчета, оптимальному проектированию и практическому применению теплообменных аппаратов с ребристыми поверхностями посвящены аналитические обзоры и монографии. Один из самых исследованных и наиболее применяемых методов повышения уровня теплообмена на поверхностях — это именно ребристые поверхности. Они используются во многих теплоохлаждающих устройствах: аппаратах воздушного охлаждения, системах охлаждающих устройств, в пластинчато-ребристых и кожухотрубчатых теплообменных аппаратах. Результатом исследований [5–12] является решение проблемы повышения эффективности и оптимизации поверхности внутреннего оребрения.

Полезное использование вторичных энергетических ресурсов, к которому относится и применение теплоты отработанных газов, однозначно приведет к значительной экономии топлива при эксплуатации стационарных энергетических установок [13–18].

Вопросы конструирования водогрейных котлов, утилизирующих тепло дымовых газов в технологических печах, рассматриваются в некоторых трудах. Результаты исследований представлены в виде установок для производства энергии и определяют тенденции и перспективы дальнейшего поиска в области их проектирования [19–23].

В настоящее время разрабатывается и реализуется на практике конвектор на дымоход заводом «АТЛАНТ», предназначенный для отбора уходящего в трубу тепла и охлаждения дымовых газов в водяном и паровом отоплении.

Цель исследования — изучение процесса конвективного нестационарного течения потока тепла, протекающего по трубе теплообменника тандыров, и на его основе разработка несложной по устройству, малогабаритной, простой в изготовлении, мощной, экономичной и безопасной модели водонагревательного устройства для нужд народного хозяйства, позволяющей сократить расходы на отопление и горячее водоснабжение зданий лепешечных.

Цель достигается при нагреве воды на двух, малой и большой, секциях сконструированного цилиндрического котла путем вертикальных газоходов реберных труб теплоприемников при прохождении через них отработанного в печах газового тепла, удаляемого в атмосферу конвекцией. Конструкция водогрейного котла, обеспечивающая теплообмен, состоит из вертикальных труб с продольно расположенными ребрами на поверхностях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Следует ожидать значительной экономии энергоресурсов и средств ввиду многочисленного регулярного использования ВКУ, который обеспечивает снижение расхода энергии за счет утилизации тепла, отходящего в атмосферу.

По результатам анализа отечественных и зарубежных исследований сформулированы факторы, влияющие на качество теплообменных аппаратов:

- зависимость от внешней и внутренней конфигурации ребра и его месторасположения. Ребро фиксируется как снаружи, так и внутренним оребрением труб;
- конструкция несущей трубы. Использование оребренной трубы разной конфигурации, преимущественно круглого и эллиптического прямоугольного сечений;
- метод соединения конструктивных составляющих оребренной трубы между собой;
- площадь поверхности теплообмена;
- степень эффективности теплообмена;
- условия эксплуатации.

Под руководством и при непосредственном участии автора статьи разработан проект здания лепешечной, по которому возведено здание лепешечной и в настоящее время эксплуатируется. В центре здания на отметке 4,2 м установлен сконструированный автором статьи ВКУ, с целью апробирования экономического эффекта последнего произведены теплофизические исследования. На рис. 1, 2 представлено объемно-планировочное решение здания лепешечной с возможным расположением по кругу группы тандыров на плане в центре здания.

Теплофизические процессы, протекающие в тепловой среде тандырного пространства и в теплообменных трубах газоходов в эксплуатационном режиме, при удалении газового конвективного потока тепла в атмосферу, изучались путем применения метода натурных исследований с помощью следующих современных портативных приборов: тепловизионного инфракрасного термометра FLIR TG165; пирометра GM1350; цифрового термометра EM 9020C; термоэлектрического актинометра AT-50; анемометра AMTAST; термоанемометра ЭА-2М; стационарного термометра, предназначенного для считывания высоких температур; лабораторного ртутного термометра ГОСТ 215-73; полупроводникового термометра типа ЭТП-М.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью получения энергии от вторичных энергетических ресурсов сконструирована несложная по устройству естественная по натуральной величине модель утилизации тепла — ВКУ в здании лепешечной с последующей апробацией его в реальных условиях эксплуатации для определения практической пригодности и применимости для горячего водоснабжения и отопления зданий лепешечных.

Поставленная цель достигнута при нагреве воды на двух, малой и большой, секциях цилиндрического котла путем вертикальных разборных газоходов реберных труб теплоприемников при прохождении через них отработанного в печах тепла, удаляемого в атмосферу конвекцией.

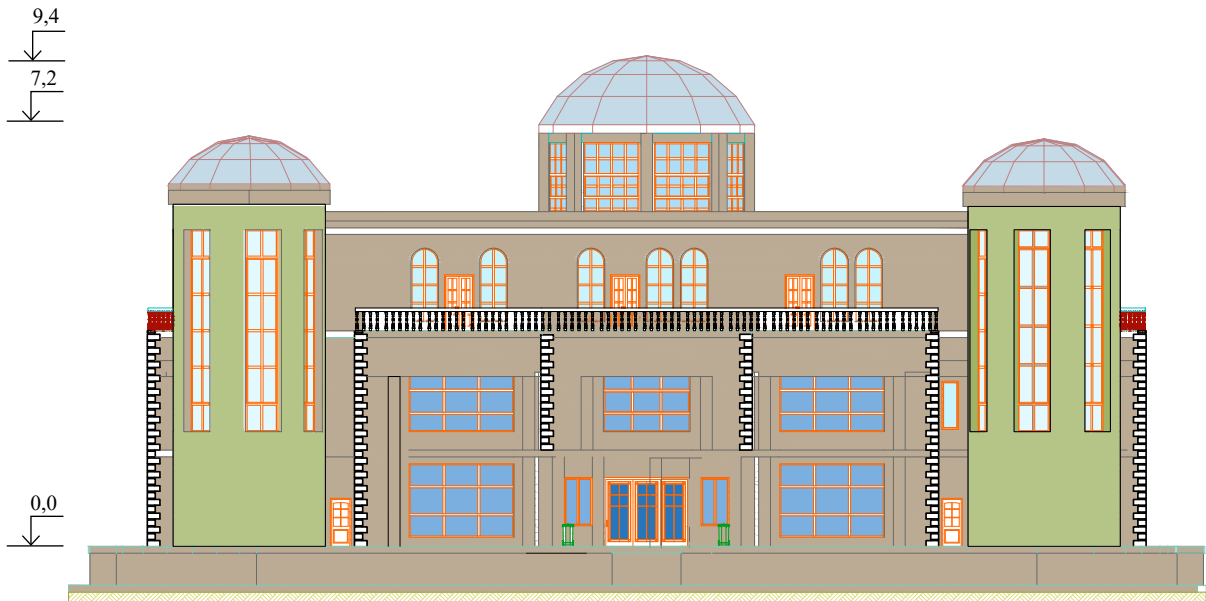


Рис. 1. Фасад здания

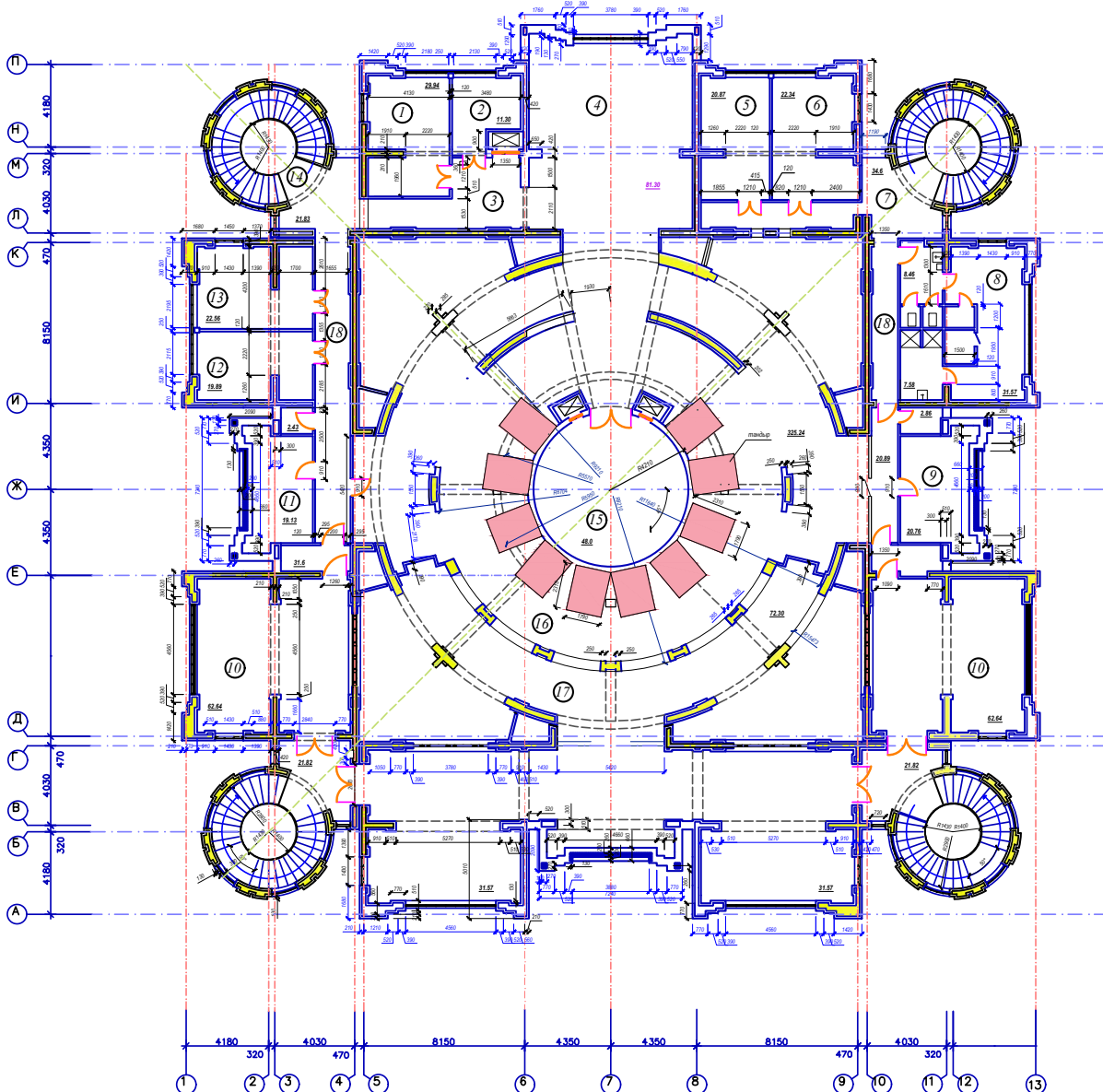


Рис. 2. Планировочное решение здания лепешечной с расположением в центре групп печей-тандыров

Конструкция водогрейного котла, обеспечивающая теплообмен, состоит из вертикальных труб с продольно расположенными ребрами в поверхностях.

Оребренная труба — сложная конструкция, каждый элемент которой выполняет особую функцию. Теплообменные свойства оребренных труб не раз подтверждались многочисленными исследованиями и испытаниями, а также многолетним опытом применения при изготовлении аппаратов воздушного охлаждения.

Эффективность теплообмена оребренных труб зависит от внешнего эквивалентного диаметра трубы, температуры и условия постоянства теплового потока по длине трубы, общей площади теплоотдачи трубы с учетом размера и шага ребер, чисел Нуссельта, Грасгофа и Прандтля.

Трубы газоходы служат теплообменником по принципу воздух–вода. Печи лепешечной функционируют одновременно целиком или группами, создавая непрерывность технологического процесса в течение суток в системе утилизации тепла, обусловленной потребностью в продуктах.

Конструкция и принцип работы ВКУ представлены на рис. 3, а, б.

Составной частью ВКУ является цилиндрический водогрейный котел 1, установленный на несущей подоснове 16. Он представляет собой цилиндрическую сварную емкость диаметром 2 м, высотой 3 м, изолированную снаружи утепляющим слоем 3 и изготовленную из нержавеющей профилированных листов или стали толщиной не менее 6 мм. ВКУ разделен вертикальной утепленной стенкой из нержавеющей листов толщиной 4 мм на емкости (отсеки) для горячего водоснабжения и отопления.

В водогрейном котле, заполненном водой, для получения максимального эффекта размещены по кругу вертикальные продольно оребренные с пластинами внутри (могут быть дополнительно и снаружи) газоотводящие теплообменные трубы диаметром 12 см, в целом составляющие нержавеющей стальные нагревательные теплоемкие теплообменники. Оребренные трубы газоходы теплообменника 5 толщиной стенки и ребер 8 мм предназначены для интенсификации теплообмена за счет турбулизации восходящих потоков, улучшающей эффект теплопереноса по всему объему канала.

ВКУ состоит из двух секций, разделен вертикальной утепленной перегородкой 4 из нержавеющей стальных листов толщиной 4 мм на емкости: меньшая по объему секция для горячего водоснабжения 8 и большая по объему для отопления 9.

В отопительный период секции 8 и 9 работают самостоятельно для горячего водоснабжения и отопления, а в остальное время объединяются воедино через сезонный переходник 2, и весь объем бака работает для горячего водоснабжения. При этом по-

требляемая мощность в тепле и воде между секциями регулируется путем межсекционного термостата и сезонного переходника. ВКУ со стороны обеих секций оснащен лестницей 7 для осмотра. ВКУ оснащен наружной лестницей 10 для подъема к горизонтальной стальной площадке 11, обеспечивающей доступ к стальной пластинчатой крышке 12, выполняющей функцию насадки над газоотводящими трубами, предназначенной для регулирования скорости отводящего потока тепла из труб в атмосферу путем изменения положения вверх/вниз и для осмотра секции бака и очистки налета труб. Бак-утилизатор оснащен указателями уровня воды 13, штуцерами 14 и патрубками 15, предназначенными для соединения трубопровода, вентилей, емкостей и других деталей котла утилизации тепла. Водозабор для ВКУ осуществляется через водопроводную сеть.

Устройство работает по принципу воздух–вода через теплообменные трубы.

На основе изучения теплофизических процессов в реальном ВКУ в целом и в газоходных теплообменных трубах при функционировании тандыров лепешечной научно и практически обосновано техническое решение конструкции котла и составлена классификация методов оребрения труб теплообменников. Каждый из приведенных методов интенсификации теплообмена в виде изменения конструкции труб теплообменника найдет свое применение в определенной отрасли как для групп, так и точечных источников тепловыделения (таб.).

Проанализировав методы оребрения труб теплообменников, отмечается следующее.

Наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена является внутреннее оребрение труб теплообменников, способствующее завихрению потока, ведущего к разрушению пограничного слоя, что уменьшает тепловое сопротивление и повышает скорость теплопередачи. Такой подход позволяет увеличить поверхность теплообмена со стороны теплоносителя с меньшей теплоотдачей. Внутреннее оребрение увеличивает передачу тепла.

По сравнению с обычными трубами трубы с внутренним оребрением обладают более высоким коэффициентом теплопередачи, который в свою очередь зависит от геометрической формы ребер и расстояния между ними. Внутреннее оребрение может выполняться продольными или спиральными ребрами разной высоты.

Разборные теплообменники «труба в трубе» позволяют осуществлять чистку наружных и внутренних поверхностей труб, а также применять оребренные внутренние трубы. Это дает возможность значительно увеличить количество передаваемого тепла.

Другим способом интенсификации теплообмена является использование трубы теплообменника с продольно-спиралеобразно разрезным и продольно радиальным оребрением, фиксированным снаружи и изнутри.

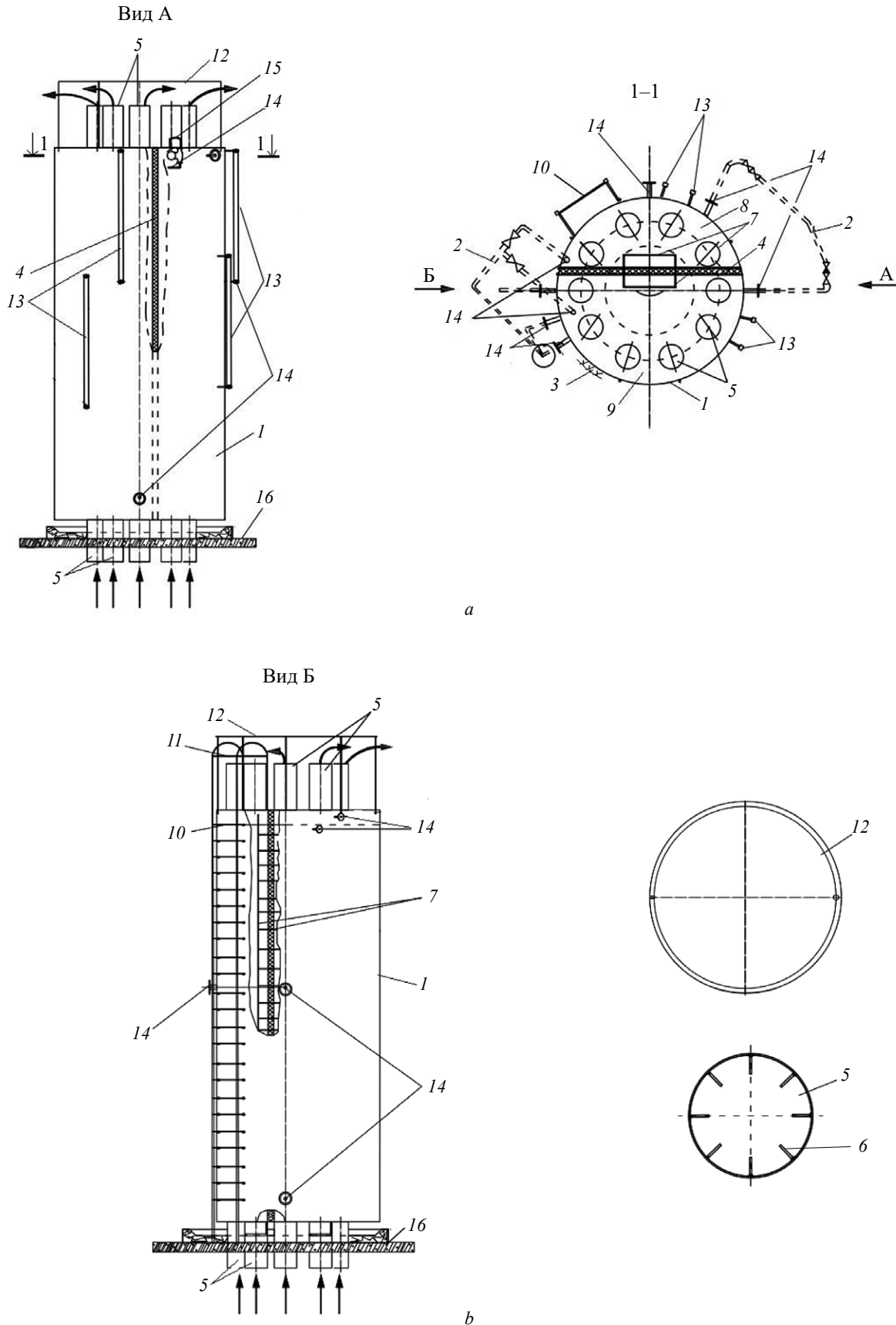
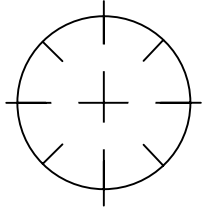
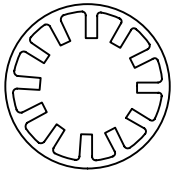
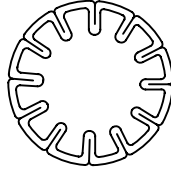
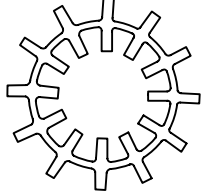
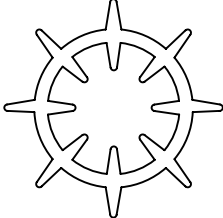
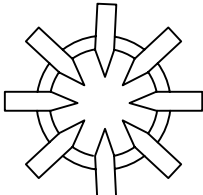
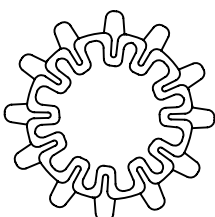
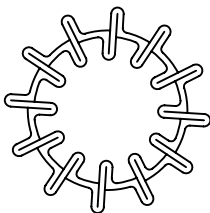
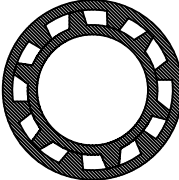
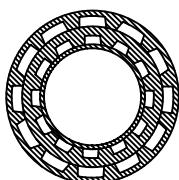
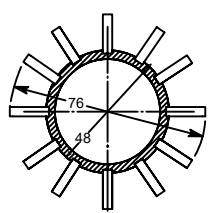
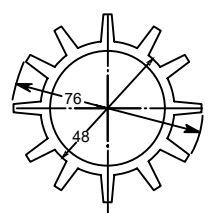
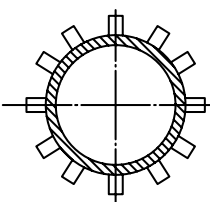
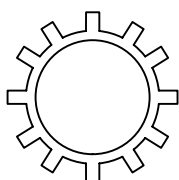


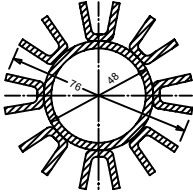
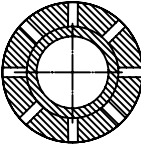
Рис. 3. Конструкция водогрейного котла-утилизатора: 1 — цилиндрический водогрейный котел; 2 — сезонный переходник; 3 — утеплитель; 4 — утепленная перегородка; 5 — трубы газоходы; 6 — ребро; 7 — лестницы; 8, 9 — секции котла; 10 — лестница наружная; 11 — площадка; 12 — смотровая крышка; 13 — уровни; 14 — штуцеры; 15 — патрубок; 16 — несущая подоснова

Классификация трубчатых теплообменников и методов продольного оребрения

Модели оребренных труб, методы оребрения	Метод продольного оребрения	Положительные и отрицательные стороны метода
	Теплообменник жесткой конструкции с продольными ребрами, фиксированными изнутри, гладко-навивные, низкорадialные ребра крепятся вдоль поверхности трубы перпендикулярно с помощью контактной сварки. Внешний диаметр трубы 120 мм, число ребер 8, высота ребер 30 мм	Простота в изготовлении и легкость в чистке внешней, затруднительность чистки внутренней поверхности, высокий коэффициент тепловосприятия и относительно меньшая теплоотдача. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 85 %
	Теплообменник жесткой конструкции типа «труба в трубе». Несущая гладкая труба с внутренней съемной трубчатой насадкой и продольно фиксированными изнутри низкорадialными ребрами	Простота в изготовлении и легкость в чистке внешней и внутренней поверхности, высокий коэффициент тепловосприятия и относительно меньшая теплоотдача. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 85 %
	Теплообменник жесткой конструкции гладко-навивная типа «труба в трубе» с продольными низкорадialными ребрами, фиксированными изнутри внешней трубы и внутренней трубчатой съемной насадкой	Простота в изготовлении и легкость чистки внешней и внутренней поверхности, высокий коэффициент тепловосприятия и относительно меньшая теплоотдача. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 85 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольными, фиксированными снаружи и изнутри гладко-навивными низкорадialными прямоугольными ребрами	Сложность в изготовлении и чистке внутренней и внешних поверхностей. Высокий коэффициент тепловосприятия и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 90 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольными радиальными выдавленными остроконечными ребрами, фиксированными снаружи и изнутри	Сложность в изготовлении и чистке внутренней и внешних поверхностей. Высокий коэффициент тепловосприятия и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 88 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольными радиальными выдавленными остроконечными внутренними ребрами, фиксированными в теле трубы	Сложность в изготовлении и чистке внутренней и внешних поверхностей. Высокий коэффициент тепловосприятия и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 88 %
	Теплообменник жесткой конструкции типа «труба в трубе» с продольными радиальными выдавленными ребрами, фиксированными в теле внешней трубы, и съемной внутренней трубчатой насадкой	Сложность в изготовлении, чистке внутренней и внешних поверхностей. Высокий коэффициент тепловосприятия и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 88 %

Продолжение таблицы

Модели оребренных труб, методы оребрения	Метод продольного оребрения	Положительные и отрицательные стороны метода
	Теплообменник жесткой конструкции типа «труба в трубе» с продольными низкорадialными ребрами, выделенными в стенах труб	Сложность в изготовлении и чистке внутренней и внешних поверхностей. Высокий коэффициент тепловосприимчивости и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 88 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольным круглым однорядным внутренним сетчатым оребрением	Сложность в изготовлении, чистке внутренней поверхности. Высокий коэффициент тепловосприимчивости и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 90 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольным круглым двухрядным внутренним сетчатым оребрением	Сложность в изготовлении, чистке внутренней поверхности. Высокий коэффициент тепловосприимчивости и теплоотдачи. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 95 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольными фиксированными снаружи гладко-навивными низкорадialными ребрами	Простота в изготовлении и легкость в чистке внутренней поверхности и затруднительность в чистке внешней, высокий коэффициент теплоотдачи и относительно меньшее тепловосприимчивости. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает значительную тепловую эффективность. КПД до 75 %
	Теплообменник жесткой конструкции с продольными выдавленными радиальными ребрами, фиксированными снаружи	Простота в изготовлении и легкость в чистке внутренней поверхности, затруднительность в чистке внешней поверхности, высокий коэффициент теплоотдачи и относительно меньшее тепловосприимчивости. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает значительную тепловую эффективность. КПД до 75 %
	Теплообменник жесткой конструкции с шиповидными продольными низкорадialными ребрами, фиксированными снаружи	Простота в изготовлении и легкость в чистке внутренней поверхности, затруднительность в чистке внешней поверхности, высокий коэффициент теплоотдачи и относительно меньшее тепловосприимчивости. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает значительную тепловую эффективность. КПД до 75 %
	Теплообменник жесткой конструкции типа «труба в трубе». Несущая гладкая труба с наружной съемной трубчатой насадкой и продольно фиксированными снаружи низкорадialными ребрами	Простота в изготовлении и легкость в чистке внешней и внутренней поверхностей, высокий коэффициент теплоотдачи, относительно меньшее тепловосприимчивости. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает значительную тепловую эффективность. КПД до 75 %

Модели оребренных труб, методы оребрения	Метод продольного оребрения	Положительные и отрицательные стороны метода
	Теплообменник жесткой конструкции с корытообразными низкорадialными продольными обрезами ребрами, фиксированными снаружи	Средняя сложность в изготовлении, легкость в чистке внутренней поверхности, затруднительность в чистке внешней поверхности, высокий коэффициент теплоотдачи и относительно меньшее тепловосприятие. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает значительную тепловую эффективность. КПД до 78 %
	Теплообменник жесткой конструкции с низкорадialным продольно-спирально разрезным оребрением, фиксированным снаружи	Сложность в изготовлении, легкость в чистке внутренней поверхности, затруднительность в чистке внешней поверхности, высокий коэффициент теплоотдачи и относительно меньшее тепловосприятие. Форма такой поверхности теплообменника обеспечивает высокую тепловую эффективность. КПД до 78 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенных исследований выявлены преимущества сконструированного ВКУ по сравнению с существующими устройствами.

Сформулирован экономический эффект от применения ВКУ в реальном строительстве, который состоит в:

- использовании вторичных энергоресурсов для получения дополнительной энергии;
- экономии тепловой энергии для горячего водоснабжения и отопления зданий и сооружений;
- экологическом эффекте проблемы «тепловая безопасность в изменении климата».

Энергетическая эффективность является одной из причин целесообразности интенсификации трубчатого теплообмена, в этой связи сформулированы основные способы конструирования теплообменных труб, к которым следует отнести:

- увеличение площади поверхностей теплообмена путем оребрения;
- конструирование сложных форм поверхностей, способных турбулизировать проходящий воздушный поток;
- снижение веса и размера;
- скорректированные аэродинамические сопротивления;
- конструирование внутренней части труб для регулирования скорости потока с целью его турбулизации и повышения тепловосприятия.

Установлено, что методы оребрения труб расширяют область применения устройства, дополнительно увеличивая коэффициент теплоемкости и теплообмена, повышают производительность устройства до 1,5 раз.

Проанализировав существующие методы оребрения теплообменных труб, рассмотрев их положи-

тельные и отрицательные характеристики, можно сделать вывод о том, что для бытовых целей они достаточно эффективны. При этом максимальный тепловой эффект отмечается при оребрении трубы изнутри и снаружи продольными ребрами, продольно-спирально разрезным оребрением и внутренним продольным круглым сетчатым оребрением.

Установлено, что КПД водогрейного котла зависит от регулярности работы тандыров лепешечной и состояния теплообменных труб. Интенсификация теплового эффекта при этом зависит от скорости движения конвективного газового теплоносителя в теплообменных трубах и степени ее турбулизации, которая регулируется созданием шероховатости внутренней стенки труб методами оребрения и перестановкой стальной смотровой крышки покрытия по отношению к верхней грани труб газоходов выше/ниже. Экономия тепловой энергии путем снижения потери тепла на выходе теплообменных труб достигает 40 % при работе печей с регулируемой крышкой-насадкой.

Определен научно-технический результат, заключающийся в повышении эффективности ВКУ, обеспечивающейся за счет эффекта нагрева, аккумуляции и теплоотдачи вертикальных оребренных стальных нагревательных теплоемких труб теплообменника, помещенных в цилиндрический котел при конвективном нагреве их отводящим газовым теплоносителем без возврата тепла в водогрейный котел.

Выявлена функция технического устройства ВКУ в системе утилизации тепла отходящих газов, сбор потока тепла горячего газа и аккумуляция энергии в отсеках бака для последующего использования потребителем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курбангалеев А.А., Тазюков Ф.Х., Батталов А.Ф., Еникеева С.Р., Лившиц С.А., Лебедев Р.В. Модель движения потока газа в трубе с диафрагмой при ламинарном режиме течения // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2021. № 3 (48). С. 261–268.
2. Сухоцкий А.Б., Сидорик Г.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60. № 4. С. 352–366. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366
3. Мадышев И.Н., Санников И.В. Сравнение различных методов интенсификации конвективного теплообмена в трубах при турбулентном течении жидкости // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. № 3. С. 71–75.
4. Kapustenko P., Arsenyeva O., Fedorenko O., Kusakov S. Integration of low-grade heat from exhaust gases into energy system of the enterprise // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 67–76. DOI: 10.1007/s10098-021-02082-3
5. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы : учебное пособие. Красноярск : ФАО РФ ГОУВПО КГТУ, 2005. 292 с.
6. Валиулин С.Н., Пискулин В.Г., Шабаров В.В. Проектирование водотрубного котла-утилизатора на базе численного моделирования тепловых и гидрогазодинамических процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2014. № 1. С. 48–54.
7. Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы: эксплуатация и ремонт : справоч. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. М. : НПО ОБТ, 2006. 113 с.
8. Лощаков И.И., Ромахова Г.А., Трещев Д.А. Характеристики котла-утилизатора парогазовых установок // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 3. С. 117–123.
9. Малков Е.С., Шелыгин Б.Л. Разработка расчетных моделей котла-утилизатора для анализа эффективности сжигания дополнительного топлива // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 1. С. 15–18.
10. Gubarev A.V., Golovkov M.A., Dyachuk D.S., Bychikhin S.A. Methods and devices of heat wasted gases utilization from stationary engines of internal combustion // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1066. P. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012018
11. Zapolskaya I.N., Vankov Yu.V., Zverev O.I., Rotach R.R. The impact of the transition of hot water “preparation” by means of individual heating stations on the Kazan energy system // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124. P. 05012. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405012
12. Webb R.L. Principles of enhanced heat transfer. Wiley : New York, 1994. 246 p.
13. Kraus A.D., Aziz A., Welty J. Extended Surface Heat Transfer. John Wiley & Sons Inc., 2001. 1105 p.
14. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань : Центр инновационных технологий, 2009. 509 с.
15. Новичков С.В., Бурденкова Е.Ю. Использование теплоты уходящих газов котла-утилизатора бинарной ПГУ для обогрева тепличного хозяйства // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 3. С. 20–24. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-3-20-24
16. Стерхов К.В. Исследование естественной циркуляции в вертикальном котле-утилизаторе : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 20 с.
17. Ениеватов А.В., Артемов И.Н., Савонин И.А. Оптимизация тепловой схемы котельной с утилизатором тепла дымовых газов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 12.
18. Зубова А.О. Актуальность утилизации теплоты дымовых газов // Инженерные и социальные системы : сб. науч. тр. 2019. С. 106–111.
19. Горфин О.С., Яблонев А.Л., Щербанов И.П. Теплоутилизаторы и очистители дымовых газов ТЭЦ // Энергия: экономика, техника, экология. 2019. № 2. С. 33–39. DOI: 10.7868/S0233361919020058
20. Dumitrescu C., Rădoi R., Cristescu C., Dumitrescu L. Experimental model of a combined thermal system for efficient use of renewable energies // INMATEH Agricultural Engineering. 2020. Vol. 60. Issue 1. Pp. 287–294. DOI: 10.35633/inmateh-60-32
21. Бураков А.А. Система охлаждения уходящих газов // Научный лидер. 2021. № 42 (44). С. 318–321.
22. Тимофеев С.В. Тригенерация на твердом топливе для автономного обеспечения // Вестник науки и образования. 2019. № 18 (72). С. 42–47.
23. Патент RU № 2382287 C1. Водогрейный теплофикационный котел-утилизатор / С.А. Петриков, А.С. Тарасов, Е.Р. Спильник, Г.Е. Рузаев. Заявка № 2008132142/06 от 06.08.2008.

Поступила в редакцию 15 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 27 сентября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: Адхам Иминжанович Гиясов — доктор технических наук, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru.

INTRODUCTION

Secondary thermal energy resources are the most common type of energy waste. One of possible ways to reduce energy costs is the recovery of thermal emissions. In addition, the problem of heat recovery from waste gases is also relevant for production facilities.

The boiler waste heat recovery unit (WHB) model can be attributed to the field of construction, hot water supply and heating. The heat recovery system is used to minimize energy consumption of hot water and heating of buildings by using the WHB.

The combustion product heat recovery approach, implemented in the proposed WHB model, has a wide range of applications. It is used in the operation of heat generators with similar design characteristics and in the design of buildings of various purposes.

In many eastern countries it is customary to organize centres for the preparation and baking of bread (flatbread), where the continuity of the baking process is ensured by a group of tandoor ovens, that may operate simultaneously.

A traditional cafeteria building is a large superstructure, which includes premises for tandoor ovens designed for baking flatbread.

Tandoor is a large oven for baking a large number of flatbreads at a time; they operate continuously and emit heat due to the combustion of solid fuel (coal, wood) or natural gas; electricity is released into the atmosphere through heat pipes. Heat can be saved by using flue gas, as well as the heat emitted by solid fuels, coal and wood, gas.

Tandoor ovens are so versatile that it is used to make equally delicious meat, fish, vegetables, mushrooms and even pastry.

The tandoor building is the most common type of production building that has a group of tandoor ovens for baking flatbread, and it can serve as a source of renewable energy resources: hot water and heating can be provided by using recycled heat that escapes into the atmosphere through heat pipes and cooling flue gases from the continuous operation of tandoor ovens.

Heat efficiency in WHB equipment for groups of heat sources is quite high. A hot water boiler utilizing heat is also acceptable for point heat sources. The product of the furnace exhaust is hot convective gas, with the rational use of which the technical and practical result is achieved.

Steady-state laminar and turbulent modes of convective gas flows in a vertical circular channel at linearly changing temperature of convective flows and walls are studied in [1–4].

Computation principles, optimal design and practical application of heat exchangers with finned surfaces are addressed in analytical reviews and monographs. Finned surface is one of the most studied and widely used methods of boosting heat exchange in many heat-cooling devices: air coolers, cooling device systems, plate and finned-pipe heat exchangers. The research result [5–12] is a solution to the problem of increasing the efficiency and optimization of internal finned surfaces.

The use of secondary energy resources, which includes the use of waste heat, will unambiguously lead to significant fuel savings during the operation of power plants [13–18].

Issues of design of hot-water boilers, consuming flue gas heat in furnaces are considered in some works. Results of researches are presented in the form of energy recovery units; they determine trends and prospects for further search in the field of their design [19–23].

The ATLANT plant is developing a chimney convector, designed for consuming heat passing through the chimney so that it could be used in water and steam heating.

The aim of the research is to study unsteady convective flows of heat in the pipes of a tandoor heat exchanger and develop a simple, small-sized, powerful, economic and safe model of a water heating device for the needs of the national economy to reduce the costs of heating and hot water supply to tandoor buildings.

The objective is achieved by heating water in two small and large sections of the designed cylindrical boiler by means of vertical gas ducts made of finned pipes of heat receivers. The heat exchange hot-water boiler consists of vertical pipes with longitudinally arranged ribs.

MATERIALS AND METHODS

Significant savings of energy resources and funds should be expected due to the numerous regular use of WHB, which ensures lower energy consumption due to the recovery of waste heat emitted into the atmosphere.

Factors, affecting the quality of heat exchangers, are formulated on the basis of the results of analysis of domestic and foreign studies:

- reliance on the external and internal configuration of the fin; its location. The rib is fixed both outside and inside the finned pipes;
- design of the bearing pipe. The use of finned pipes, having different configurations, mainly, round and elliptical rectangular cross-sections;

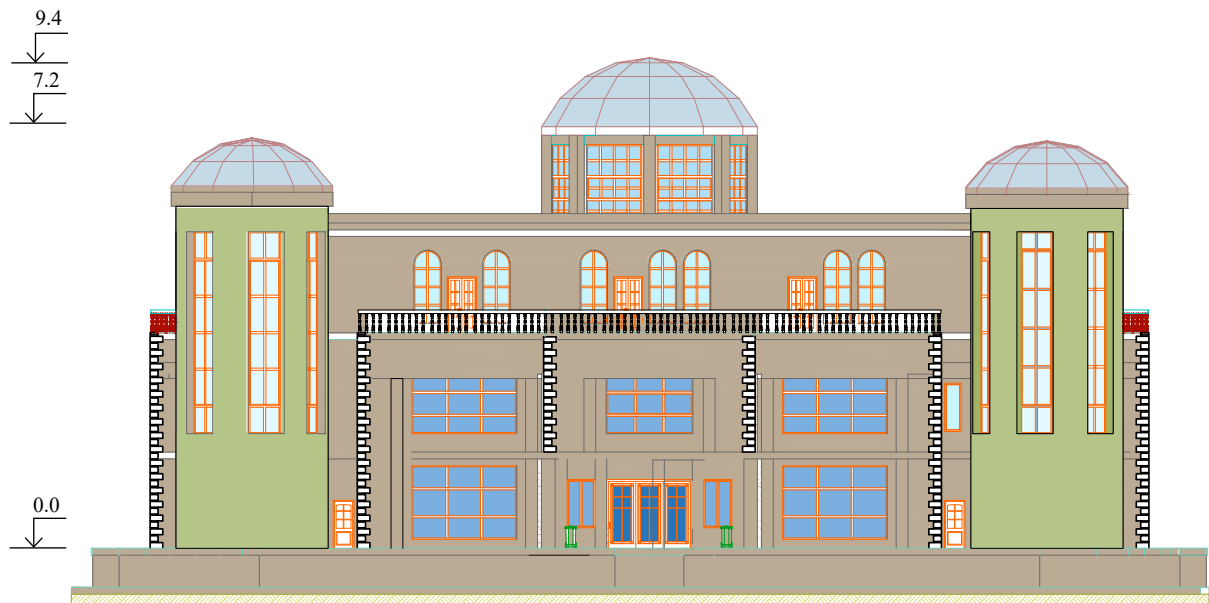


Fig. 1. Building facade

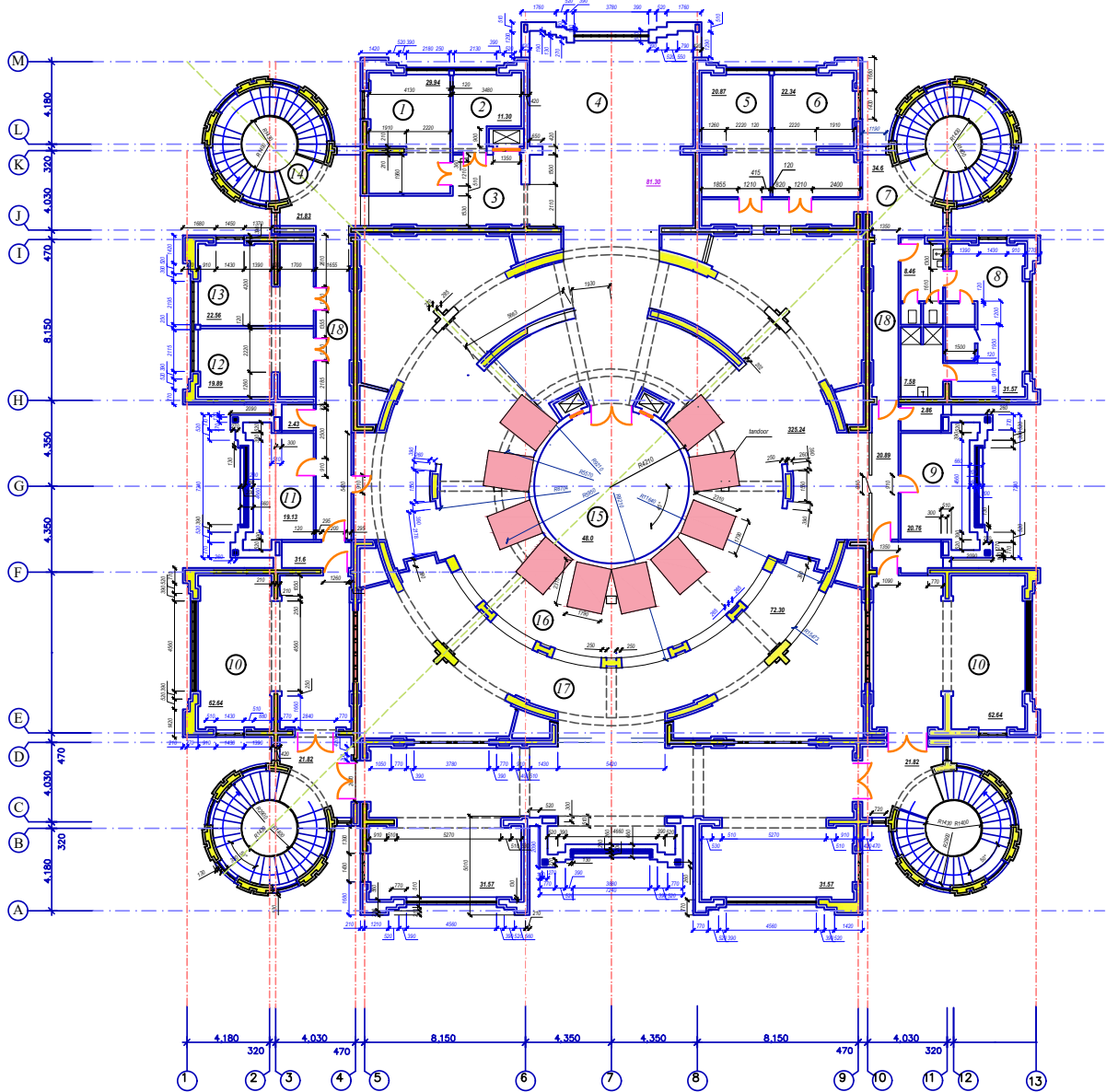


Fig. 2. Layout of the cafeteria building that has tandoor ovens

- the method of connecting structural components of the finned pipe;
- the heat exchange surface area;
- the extent of heat exchange efficiency;
- operating conditions.

The design of the tandoor building was developed under the supervision and with the involvement of the author. The building is currently in operation. The WHB, designed by the author, is installed in the centre of the building at the elevation of 4.2 m. Thermophysical studies were performed to test the economic effect of the WHB. Figures 1, 2 show the space-planning solution of the building with a possible location of a group of tandoor ovens.

Thermophysical processes in the thermal environment of the tandoor space and in heat-exchange pipes of gas ducts were studied by applying the method of field studies using the following modern portable instruments: FLIR TG165 thermal infrared thermometer; GM1350 pyrometer; EM 9020C digital thermometer; AT-50 thermoelectric actinometer; AMTAST anemometer; EA-2M thermal anemometer; stationary thermometer designed for reading high temperatures; GOST 215-73 laboratory mercury thermometer; ETP-M type semiconductor thermometer.

RESEARCH RESULTS

A simple natural size model of heat recovery was designed with the purpose of obtaining energy from secondary energy resources. It was further tested in real operating conditions to determine the practical suitability and applicability for hot water supply and heating of buildings.

The objective was achieved when water was heated in two, small and large, sections of a cylindrical boiler by vertical collapsible gas ducts of finned pipes of heat receivers.

The design of the hot-water boiler, which ensures heat exchange, consists of vertical pipes with longitudinally arranged ribs on the surfaces.

A ribbed pipe is a complex structure, each element of which performs a specific function. The heat exchange properties of such pipes have been repeatedly confirmed by numerous studies and tests, as well as many years of experience in the manufacture of air coolers.

The efficiency of heat exchange depends on the external diameter of the pipe, the temperature and the constancy of heat flows along the pipe length, the total area of heat transfer in the pipe, taking into account the size and spacing of ribs, Nusselt, Grashof and Prandtl numbers.

Pipe gas ducts serve as a heat exchanger that operates according to the air-water principle. Tandoor ovens operate simultaneously or in groups, ensuring a continuous process throughout the day in the heat recovery system due to the demand for the products.

The design and operating principle of the WHB is shown in Fig. 3, *a, b*.

The WHB has cylindrical water heating boiler 1, mounted on support base 16. It represents a cylindrical welded vessel 2 m in diameter, 3 m high; it is insulated by insulation layer 3 and made of profiled stainless sheets or steel with thickness not less than 6 mm. WHB is divided by a vertical insulated wall made of 4 mm thick stainless steel sheets into tanks (compartments) for hot water supply and heating.

Gas discharging heat exchange pipes, 12 cm in diameter are placed in a circle inside the water-filled hot-water boiler. The pipes are vertical longitudinally finned with plates to maximize their efficiency. Ribbed pipes of gas ducts in heat exchanger 5, with the wall thickness and fins of 8 mm, are designed to intensify heat exchange by agitating upward flows, improving the effect of heat transfer throughout the volume of the duct.

WHB consists of two sections, divided by vertical insulated partition 4 into tanks by 4 mm thick stainless steel sheets: a smaller section is for hot water (8) and a larger section is for heating (9).

During the heating period, sections 8 and 9 operate independently for hot water supply and heating, and when the heating is off, they are combined by seasonal adapter 2 and the whole volume of the tank is used to supply hot water. At the same time, power consumption is regulated by an inter-section thermostat and a seasonal adapter. WHB is equipped with inspection ladder 7 accessible from both sections. WHB is equipped with external ladder 10 to ensure access to horizontal steel platform 11 and steel plate cover 12 serving as a nozzle over the gas discharge pipes, designed to regulate the rate of heat discharge from the pipes to the atmosphere by changing the up/down position, to inspect the tank section, and to remove the sediments. The heat recovery tank is equipped with water level indicators 13, fittings 14 and nozzles 15 designed for connecting piping, valves, tanks and other parts of the heat recovery boiler.

The device works according to the air-water principle through the heat-exchange pipes.

Having studied the thermal-physical processes in the real WHB as a whole and in the gas-exchange pipes during the operation of a tandoor oven, the author theoretically and practically substantiated the boiler design solution and classified methods of pipe finning. Each of the proposed methods of heat exchange intensification will find its application in a particular industry.

The most efficient way to intensify heat exchange is the internal finning of pipes of heat exchangers, which agitates the flow, destroys the boundary layer, reduces thermal resistance, and increases the rate of heat transfer. This approach increases the heat transfer surface on the coolant side that demonstrates less intensive heat transfer. Internal fins increase heat transfer.

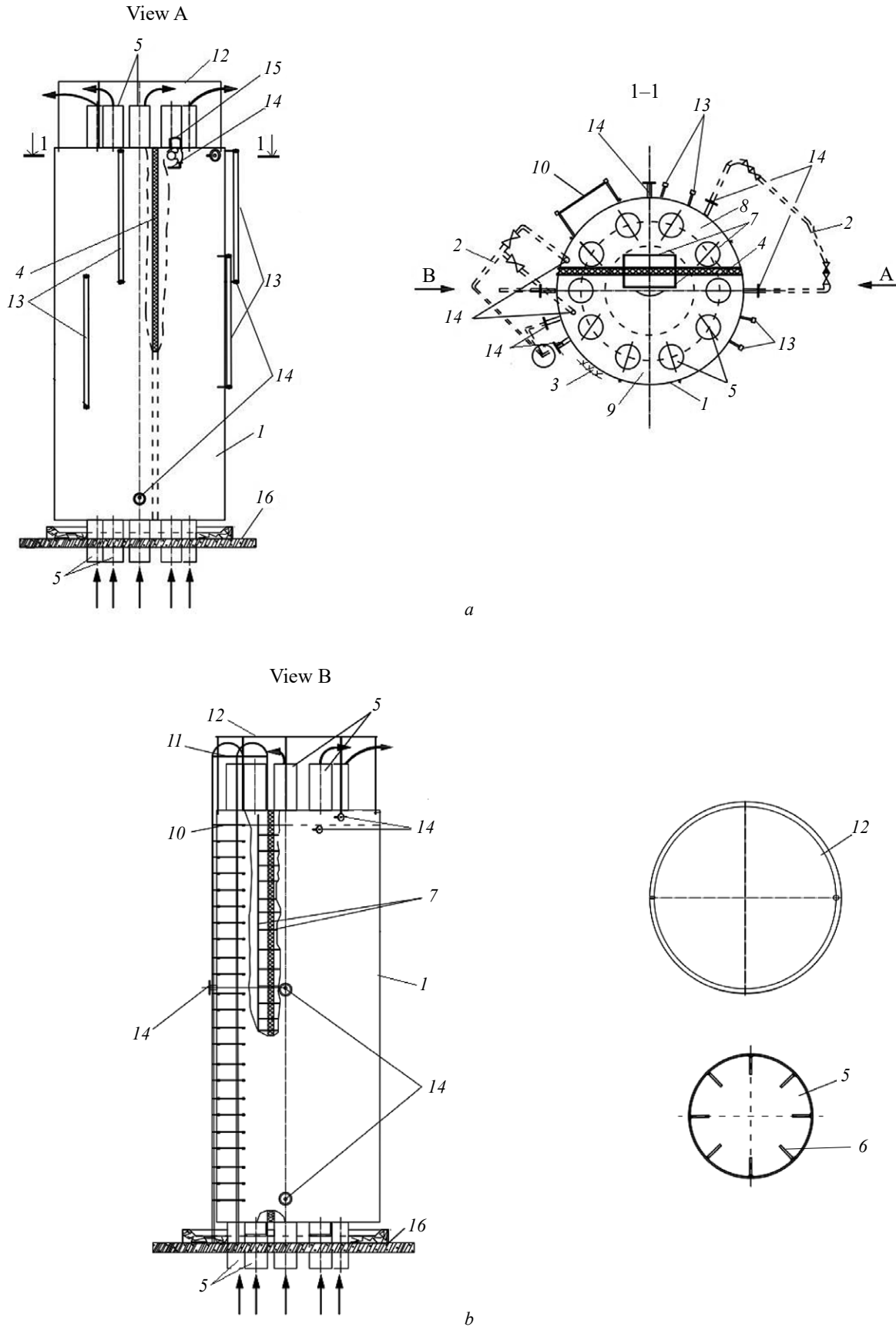
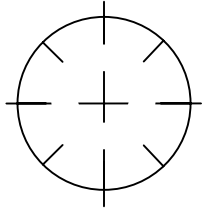
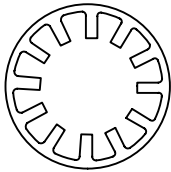
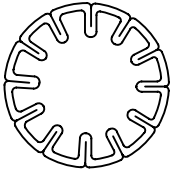
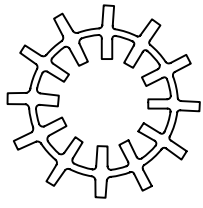
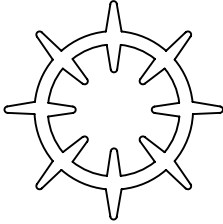
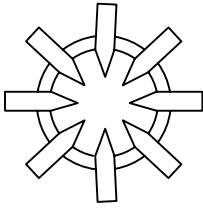
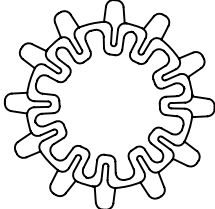
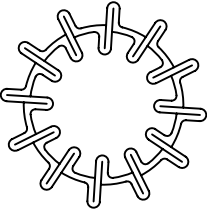
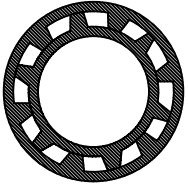
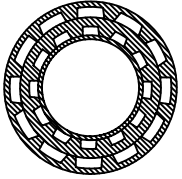
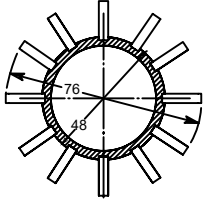
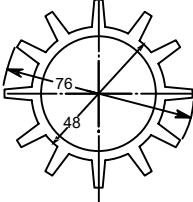
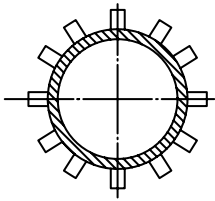
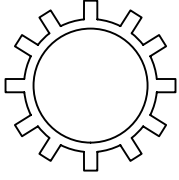
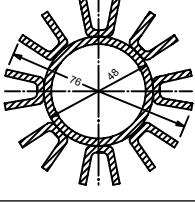


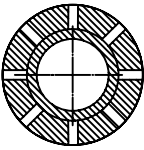
Fig. 3. Construction of the water-heating waste heat boiler: 1 — cylindrical water-heating boiler; 2 — seasonal adapter; 3 — insulation; 4 — insulated partition; 5 — gas pipes; 6 — fins; 7 — ladders; 8, 9 — boiler sections; 10 — external ladder; 11 — platform; 12 — inspection lid; 13 — levels; 14 — connectors; 15 — branch pipe; 16 — supporting sub-base

Classification of pipe heat exchangers and methods of longitudinal finning

Models of finned pipes, finning methods	Longitudinal finning method	Positive and negative aspects of the method
	A rigid structure heat exchanger with longitudinal ribs fixed from the inside; smoothly wound, low-radial ribs are fixed along the pipe surface perpendicularly by means of contact welding. The external diameter of the pipe is 120 mm, number of ribs — 8, height of ribs — 30 mm	Easy to manufacture and easy to clean the external surfaces, difficult to clean the inner surface, high heat absorption coefficient and relatively lower heat transfer. The shape of this heat exchanger surface provides high thermal efficiency. Efficiency up to 85 %
	Rigid structure pipe-in-pipe heat exchanger. A smooth bearing pipe with a removable internal pipe nozzle longitudinally fixed from the inside by low radial ribs	Easy to manufacture and easy to clean outer and inner surfaces, high heat absorption coefficient and relatively low heat transfer. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 85 %
	Rigid structure smooth pipe-in-pipe heat exchanger with longitudinal low-radial fins, fixed from the inside of the outer pipe and the inner tubular removable nozzle	Easy to manufacture and easy to clean outer and inner surfaces, high heat absorption coefficient and relatively low heat transfer. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 85 %
	Rigid structure heat exchanger with longitudinal, externally and internally fixed smoothly wound low radial rectangular ribs	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 90 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinal radially extruded pointed ribs, fixed from outside and inside	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 88 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinal radially extruded pointed inner fins fixed in the body of the pipe	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 88 %
	This rigid structure pipe-in-pipe design heat exchanger has fins fixed in the outer pipe body and a removable inner pipe element	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 88 %

Continuation of the Table

Models of finned pipes, finning methods	Longitudinal finning method	Positive and negative aspects of the method
	This rigid pipe-in-pipe design of a heat exchanger has longitudinal low radial ribs protruded into the pipe walls	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 88 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinal circular single-row internal mesh fins	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 90 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinal circular double-row internal mesh fins	Inner and outer surfaces are difficult to manufacture and clean. High coefficient of heat absorption and heat dissipation. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 95 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinally fixed low-radial fins fixed from the outside	Its inside surface is easy to manufacture and clean and its outside surface is difficult to clean, this unit has a high heat transfer coefficient and relatively low heat absorption. The shape of this heat exchanger surface ensures significant thermal efficiency. Efficiency up to 75 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinal extruded radial ribs fixed on the outside	Its inside surface is easy to manufacture and clean and its outside surface is difficult to clean, this unit has a high heat transfer coefficient and relatively low heat absorption. The shape of this heat exchanger surface ensures significant thermal efficiency. Efficiency up to 75 %
	This rigid structure heat exchanger has longitudinal low radial ribs fixed on the outside	It has easy to manufacture and easy to clean inside surfaces, difficult to clean outside surface, a high heat transfer coefficient and relatively low heat absorption. The shape of this heat exchanger surface ensures significant thermal efficiency. Efficiency up to 75 %
	This is a rigid structure pipe-in-pipe heat exchanger. It has a load-bearing smooth pipe with a removable pipe nozzle and low radial ribs fixed longitudinally on the outside	It has easy to manufacture and easy to clean external and internal surfaces, a high heat transfer coefficient, relatively low heat absorption. The shape of this heat exchanger surface ensures significant thermal efficiency. Efficiency up to 75 %
	This rigid structure heat exchanger with tub-like, low-radial longitudinal ribs, fixed on the outside	This structure features medium complexity in manufacturing and easily cleaned inner surface, a high heat transfer coefficient and relatively low heat absorption. The shape of this heat exchanger surface ensures significant thermal efficiency. Efficiency up to 78 %

Models of finned pipes, finning methods	Longitudinal finning method	Positive and negative aspects of the method
	This rigid structure heat exchanger has low radial longitudinally-cut fins, fixed on the outside	It has difficult to manufacture, easy to clean inner surface; difficult to clean outer surface; a high heat transfer coefficient and relatively low heat absorption. The shape of this heat exchanger surface ensures high thermal efficiency. Efficiency up to 78 %

Compared to conventional pipes, pipes with internal fins have a higher heat transfer coefficient, which in turn depends on the geometric shape of the fins and the distance between them. Internal fins can represent longitudinal or spiral ribs of different heights.

Collapsible pipe-in-pipe heat exchangers allow for the cleaning of the outer and inner surfaces of pipes, as well as the use of finned inner pipes to significantly increase the amount of transferred heat.

Another way to intensify heat transfer is to use a pipe heat exchanger with longitudinally-cut and longitudinally-radial fins, fixed on the outside and inside.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The advantages of the designed WHB are identified in comparison with the existing devices.

The economic effect of WHB application in real construction is formulated:

- using secondary energy resources to obtain additional energy;
- saving thermal energy needed for hot water supply and heating of buildings and constructions;
- the ecological effect of the problem of “thermal security in climate change”.

Energy efficiency is one of the reasons for the intensification of tubular heat exchange; in this regard, the main ways of designing heat exchange pipes should include:

- increasing the area of heat exchange surfaces by means of ribbing;
- designing complex shapes of surfaces, capable of agitating air streams;
- low weight and size;

- improved aerodynamic resistance;
- designing the inner part of pipes that can regulate the flow velocity to agitate inner flows and increase heat absorption.

The author has found that pipe finning methods expand the scope of application of this device, increase the coefficient of heat capacity and heat exchange, as well as the productivity of the device up to 1.5 times.

Having analyzed the current methods of pipe finning and their positive and negative characteristics, we can conclude that they are quite effective for domestic purposes. The maximum thermal effect is observed when the pipe is finned by longitudinal ribs from inside and outside, if it has longitudinally spiral cut fins and internal longitudinal circular mesh fins.

The efficiency of water heating boilers depends on the regularity of operation of tandoor ovens and the state of the heat exchange pipes. In this case, the intensification of the thermal effect depends on the velocity of the convective gas coolant in the heat exchange pipes and the degree of its agitation, which is regulated by the roughness of the inner wall of the pipes. 40 % of heat energy can be saved by reducing heat loss at the outlet of the heat-exchange pipes during the operation of ovens having adjustable covers.

The theoretical and practical result consists in increasing the efficiency of WHB due to the heating, heat accumulation and transfer by vertical finned steel heat exchanger heating pipes, placed in a cylindrical boiler.

The function of WHB in the waste gas heat recovery system is collection of hot gas heat, accumulation of energy in the tank compartments, and its subsequent use by a consumer.

REFERENCES

1. Kurbangaleyev A.A., Tazyukov F.Kh., Batalov A.F., Yenikeyeva S.R., Livshits S.A., Lebedev R.V. Model of laminar gas flow motion in a tube with a diaphragm. *Scientific-Technical Collection book. Vesti gazovoy nauki.* 2021; 3(48):261-268. (rus.).

2. Sukhotskii A.B., Sidorik G.S. Experimental study of heat transfer of a single-row bundle of finned tubes in mixed convection of air. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations.* 2017; 60(4):352-366. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366 (rus.).

3. Madyshev I.N., Sannikov I.V. Comparison of different methods of convective intensification of heat transfer in tubes at turbulent flow of liquid. *Bulletin of the Technological University.* 2021; 24(3):71-75. (rus.).

4. Kapustenko P., Arsenyeva O., Fedorenko O., Kusakov S. Integration of low-grade heat from exhaust

gases into energy system of the enterprise. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022; 24(1):67-76. DOI: 10.1007/s10098-021-02082-3

5. Boyko E.A. *Boiler plants and steam generators: tutorial*. Krasnoyarsk, FAO RF GOUVPO KSTU, 2005; 292. (rus.).

6. Valiulin S.N., Piskulin V.G., Shabarov V.V. Designing of the water-tube recovery boiler based on numerical modeling of heat and hydro-gasdynamic processes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2014; 1:48-54. (rus.).

7. Zykov A.K. *Steam and hot water boilers: operation and repair. 2nd ed. revised and additional*. Moscow, NPO OBT, 2006; 113. (rus.).

8. Loshchakov I.I., Romakhova G.A., Treshchev D.A. The performance of the heat recovery steam generator for combined cycle power plants suitable for load cycling duties. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2009; 3:117-123. (rus.).

9. Malkov E.S., Shelygin B.L. Development of computational models of a waste heat boiler for the analysis of the efficiency of combustion of additional fuel. *Vestnik IGEU*. 2013; 1:15-18. (rus.).

10. Gubarev A.V., Golovkov M.A., Dyachuk D.S., Bychikhin S.A. Methods and devices of heat wasted gases utilization from stationary engines of internal combustion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1066:012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012018

11. Zapolskaya I.N., Vankov Yu.V., Zverev O.I., Rotach R.R. The impact of the transition of hot water “preparation” by means of individual heating stations on the Kazan energy system. *E3S Web of Conferences*. 2019; 124:05012. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405012

12. Webb R.L. *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Wiley, New York, 1994; 246.

13. Kraus A.D., Aziz A., Welty J. *Extended Surface Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Inc., 2001; 1105.

14. Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gurev V.M. *Physical foundations and industrial application of heat intensification of heat exchange intensification / Under the general editorship of Yu.F. Gortyshov*. Kazan, Center for Innovative Technologies, 2009; 509. (rus.).

15. Novichkov S., Burdenkova E. Heating a greenhouse facility by waste heat from exhaust recovery boiler gas of a binary cycle & cogeneration plant. *Energy Safety and Energy Economy*. 2020; 3:20-24. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-3-20-24 (rus.).

16. Sterkhov K.V. *Study of natural circulation in a vertical waste heat boiler : dis. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2017; 20. (rus.).

17. Artemov I.N., Enivatov A.V., Savonin I.A. Optimization of the boiler house thermal scheme with the utilization of flue gas heat. *Engineering journal of Don*. 2018; 1(48):12. (rus.).

18. Zubova A.O. Actuality of utilization of heat of smoky gases. *Engineering and Social Systems: collection of scientific papers*. 2019; 106-111. (rus.).

19. Gorfin O.S., Yablonev A.L., Shcherbakov I.P. Heat recovery units and flue gas cleaners at CHPP. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2019; 2:33-39. DOI: 10.7868/S0233361919020058 (rus.).

20. Dumitrescu C., Rădoi R., Cristescu C., Dumitrescu L. Experimental model of a combined thermal system for efficient use of renewable energies. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2020; 60(1): 287-294. DOI: 10.35633/inmateh-60-32

21. Burakov A.A. Exhaust gas cooling system. *Scientific Leader*. 2021; 42(44):318-321. (rus.).

22. Timofeev S.V. Trigeneneration for a solid fuel autonomous. *Herald of Science and Education*. 2019; 18(72):42-47. (rus.).

23. Patent RU No. 2382287 C1. *Hot-water heat-extraction recovery boiler / S.A. Petrikov, A.S. Tarasov, E.R. Spilnik, G.E. Ruzaev*. Application No. 2008132142/06 of 08/06/2008. (rus.).

Received June 15, 2022.

Adopted in revised form on September 27, 2022.

Approved for publication on September 27, 2022.

B I O N O T E S : **Adham I. Giyazov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru.