

УДК 620.91:504.062

© А. Л. Шкаровский, д-р техн. наук, профессор  
© А. М. Гримитлин, д-р техн. наук, профессор  
© В. Р. Таурит, д-р техн. наук, профессор  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: szkarowski@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,  
taurit\_v\_r@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-92-99

© A. L. Shkarovskiy, Dr. Sci. Tech., Professor  
© A. M. Grititlin, Dr. Sci. Tech., Professor  
© V. R. Taurit, Dr. Sci. Tech., Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: szkarowski@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,  
taurit\_v\_r@mail.ru

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

### UTILIZATION OF WASTE WATER HEAT FROM A WOODWORKING PLANT

Представлены результаты исследований использования теплового потенциала промышленных стоков, образующихся при производстве улучшенных древесноволокнистых плит, а также охлаждения сточных вод до температуры около 40 °С. Рассмотрены задачи разработки и расчетов двух теплообменников для утилизации теплоты, эффективного отделения взвешенных веществ центрифугированием на этапе предварительной очистки с последующим отводом в общесплавную систему канализации. Выполнено конструктивное проектирование для двух вариантов утилизации теплоты. Разработан кожухотрубчатый теплообменник для нагрева воды на отопление производственного корпуса мощностью 470 кВт, а также рекуператор для нагрева приточного воздуха в системе вентиляции котельной мощностью 1700 кВт. Научные и практические результаты работы дают возможность значительно повысить эффективность использования теплоты и решить проблемы переработки образующихся сточных вод.

*Ключевые слова:* технологические сточные воды, деревообрабатывающее предприятие, утилизация теплоты, кожухотрубчатый теплообменник, рекуператор теплоты.

The article presents the results of studies regarding the use of the thermal potential of industrial wastewater generated during the production of improved fiberboards, as well as cooling wastewater to a temperature of about 40 °C. The authors consider the problems of developing and calculating two heat exchangers for heat recovery and effective separation of suspended solids by centrifugation at the pre-treatment stage with subsequent discharge into a common sewage system. Structural design has been completed for two heat recovery options. There has been worked out a shell-and-tube heat exchanger for heating water for a production building with a capacity of 470 kW, as well as a recuperator unit for heating the supply air in the ventilation system of a boiler room with a capacity of 1700 kW. Scientific and practical results of the work make it possible to significantly increase the efficiency of heat use and solve the problems of processing generated wastewater.

*Keywords:* technological wastewater, woodworking enterprise, heat utilization, shell-and-tube heat exchanger, heat recuperator unit.

#### Введение

Требования устойчивого развития экономики приводят к тому, что в энергетической политике промпредприятий все больше внимания уделяется возможностям утилизации теплоты различных технологических отходов, в том числе промышленных сточных вод [1–4]. Это обусловлено, прежде всего, растущими расходами на энергообеспече-

ние технологических процессов, отопление и вентиляцию производственных помещений. В случае сточных вод с повышенной температурой соответственно растет получаемый экономический эффект утилизации вторичной теплоты [5]. Если обычные коммунальные стоки имеют температуру 10–20 °С, то в случае промышленных сточных вод их температура может составлять

40 °С и выше. Следует отметить, что снижение температуры стоков на 1 °С эквивалентно тепловому потоку 1,16 кВт, получаемому от 1 м<sup>3</sup>/ч сточных вод [6, 7]. В некоторых отраслях промышленности утилизация вторичной теплоты может обеспечить до 60 % теплового баланса предприятия [4, 8].

Если промышленные сточные воды отводятся в систему биологической очистки систем канализации, утилизация теплоты становится ключевым элементом, не только желательным, но и необходимым. Сопутствующее утилизации теплоты снижение температуры стоков позволяет более эффективно удалить из них коллоидные и взвешенные примеси. Это, в свою очередь, обеспечивает снижение стоимости дальнейшей очистки на канализационных станциях. Кроме того, промышленные стоки с повышенной температурой могут представлять собой существенную угрозу для окружающей среды по экологическим показателям [8–10]. Таким образом, использование теплового потенциала промышленных сточных вод обосновано не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

Если стоки образуются непрерывно и в значительных количествах, рекуперация их теплоты имеет смысл независимо от других показателей. Промышленность выпускает готовые системы для утилизации теплоты жидких отходов. Чаще всего речь идет о теплообменных аппаратах и тепловых насосах [5, 11–13]. Однако во многих случаях технологические стоки как источники вторичной теплоты имеют ограниченный энергетический потенциал, который может существенно меняться во времени. Зависит это от характеристик технологического процесса, его регулирования и количества используемой воды. Переменный физико-химический состав стоков, их трудно прогнозируемая температура и расход чрезвычайно затрудняют применение и снижают эффективность вы-

пускаемых промышленно готовых устройств такого назначения [14].

Чаще всего требуется индивидуальный подход к решению задачи эффективной утилизации теплоты, основанный на тщательном обследовании конкретной технологии и учете параметров образующихся сточных вод, что и составляет суть представленного в настоящей публикации исследования.

#### **Предмет исследования и постановка задачи**

Объектом исследований является предприятие фирмы Homanit в г. Карлино, Польша. Предприятие выпускает тонкие древесноволокнистые плиты с улучшенной поверхностью средней и высокой плотности в различных вариантах.

Наиболее важным с рассматриваемой точки зрения для предприятия был цикл термообработки древесины водяным паром, в котором образуется в среднем 8,3 м<sup>3</sup>/ч сточных вод с температурой 90 °С [15]. Предварительные исследования показали, что стоки содержат ряд химических загрязнений, главными из которых являются сахара в виде дисахаридов [16]. Эти углеводы, в свою очередь, содержат маннозу, арабинозу, галактозу, ксилозу, глюкозу, а также целлюлозу и гемицеллюлозу. Присутствуют также органические кислоты: муравьиная, уксусная и в небольших количествах пропионовая. Кроме этого стоки содержат взвешенные примеси от механической очистки древесины: песок и мелкие фракции древесного волокна размером около 1 мм. Реакция сточных вод кислая и колеблется в пределах рН = 5,0–5,5 [15, 16].

Стоки такого состава характеризуются выраженной склонностью к коагуляции с последующим приклеиванием к стенкам трубопроводов и оборудования [17]. По этой причине, а также для снижения стоимости обработки сточных вод на канализационной станции, технологические стоки проходят предварительную очистку на предприятии.

Для этого используется центрифуга, но ее эффективность очень ограничена из-за высокой температуры среды. Технология центрифугирования предусматривает температуру не более 40 °С. Для снижения температуры стоков используются две вентиляторные градирни. Их производительность не всегда достаточна для охлаждения стоков до требуемой температуры, из-за чего наблюдается просок примесей в канализацию. Кроме того, отводимая теплота попросту теряется в окружающую среду.

Целью исследований была разработка технологии надежного охлаждения стоков переменного расхода до требуемой температуры с сопутствующей утилизацией из теплоты на отопление или производственные цели. Методикой исследований были теоретические расчеты, основанные на доступной информации о технологических процессах, а в необходимых случаях — на собственных измерениях необходимых параметров.

### Результаты исследований

**1. Кожухотрубный теплообменник для отопления.** В первую очередь было исследовано использование теплоты стоков на отопление производственного здания. Разработана концепция кожухотрубного теплообменника, состоящего из цилиндрического корпуса с пучком прямых тонкостенных трубок, являющихся поверхностью теплообмена. Охлаждающая вода течет внутри

трубок, а охлаждаемые стоки — в межтрубном пространстве. Использование авторами конструкции, которая считается несколько устаревшей, объясняется обеспечением возможности быстрой и упрощенной очистки межтрубного пространства с учетом особых физико-химических характеристик стоков.

Выполнены конструктивные расчеты теплообменника [18, 19] на основании полученных непосредственными измерениями данных о потоках теплоносителей [20]. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

При этих данных утилизируемый поток теплоты составляет

$$Q_1 = \frac{V_1}{3600} \rho c_p (t_1' - t_1'') = \\ = \frac{8,3}{3600} 980,5 \cdot 4,183 (90 - 40) = 472,8 \text{ кВт.}$$

Из баланса энтальпии потоков определены также массовые расходы теплоносителей: для стоков  $M_1 = 2,26$  кг/с; для воды  $M_2 = 1,89$  кг/с.

Корпус теплообменника выполнен из стальной шовной трубы 114×2,5 мм с внутренним диаметром 109 мм. Трубный пучок состоит из стальных бесшовных трубок 12×1 мм (внутренний диаметр 10 мм). Рекомендуемая скорость теплоносителей для таких конструкций составляет [18]: для межтрубного пространства (охлаждаемые стоки) — 0,45 м/с; для трубного пучка (охлаж-

Таблица 1

Исходные данные для расчета кожухотрубного теплообменника

№ п/п	Показатель	Величина, размерность
1	Расход сточных вод	$V_1 = 8,3 \text{ м}^3/\text{ч}$
2	Начальная температура стоков	$t_1' = 90 \text{ °С}$
3	Ожидаемая температура охлажденных стоков	$t_1'' = 40 \text{ °С}$
4	Начальная температура охлаждающей воды	$t_2' = 20 \text{ °С}$
5	Ожидаемая температура воды на выходе	$t_2'' = 80 \text{ °С}$
6	Удельная теплоемкость стоков (при средней температуре 65° С)	$c_p = 4183 \text{ кДж}/(\text{кг}\times\text{К})$
7	Плотность стоков (при средней температуре 65 °С)	$\rho = 980,5 \text{ кг}/\text{м}^3$

дающая вода, служащая впоследствии теплоносителем в системе отопления) — 0,65 м/с.

На рис. 1 представлен поперечный разрез теплообменника, полученный в результате конструирования, исходя из рекомендуемых скоростей и условия оптимального заполнения межтрубного пространства. Количество трубок в пучке составляет 37. Для такой конструкции действительные скорости течения теплоносителей составляют: для межтрубного пространства  $w_1 = 0,45$  м/с, для трубного пучка  $w_2 = 0,66$  м/с.

Выполнены расчеты параметров теплообмена [19, 20], результаты которых представлены в табл. 2.

Полученные результаты характерны для теплообменников данного типа, что позволило выполнить дальнейший конструктивный расчет. Для известных характеристик материала трубок (сталь 1.401, толщина стенки 1 мм) определен коэффициент теплопередачи исследуемого процесса теплообмена  $k = 1681$  Вт/(м<sup>2</sup>×К).

Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена свидетельствует о возможности использования в дальнейших расчетах средней арифме-

тической разности температур [21], которая составляет  $\Delta t = 15$  °С. Это позволило определить требуемую поверхность трубного пучка 18,52 м<sup>2</sup>, а длина труб при принятой ранее конструкции поперечного сечения составила 13,28 м. По конструктивным соображениям рекомендовано выполнить теплообменник в виде трех секций длиной по 4,5 м.

Гидравлический расчет позволил определить потери напора в каждом рабочем пространстве теплообменника и соответствующую мощность привода насосов: 260 Вт по стокам и 540 Вт по охлаждающей воде.

Основные размеры такой секции представлены на рис. 2. Для очистки межтрубного пространства на корпусе секции предусмотрены ревизионные лючки. На подключении патрубков стоков по обеим сторонам предусмотрены кольцевые коллекторы, обеспечивающие выравнивание скоростей в патрубке и межтрубном пространстве.

Разработанный теплообменник обеспечивает утилизацию теплоты среднего суточного расхода сточных вод (8,3 м<sup>3</sup>/ч). Для реагирования на изменение этого расхода (до 30 м<sup>3</sup>/ч) рекомендован блок из четырех таких трехсекционных теплообменников с индивидуальными насосными установками и соответствующей системой автоматики.

Зависимость теплового потока одного трехсекционного теплообменника от расхода сточных вод представлена на рис. 3.

**2. Воздухонагреватель системы приточной вентиляции.** В качестве другого способа утилизации теплового потенциала производственных сточных вод была исследована возможность нагрева приточного воздуха системы вентиляции котельной предприятия. Обычно в котельных основная часть этого воздуха в зимний период поступает на горение топлива в котлах. В настоящее время для этого используется масляный воздухонагреватель с электроподогревом масла.

Разработан двухрядный трубчатый воздухонагреватель с перекрестным движением

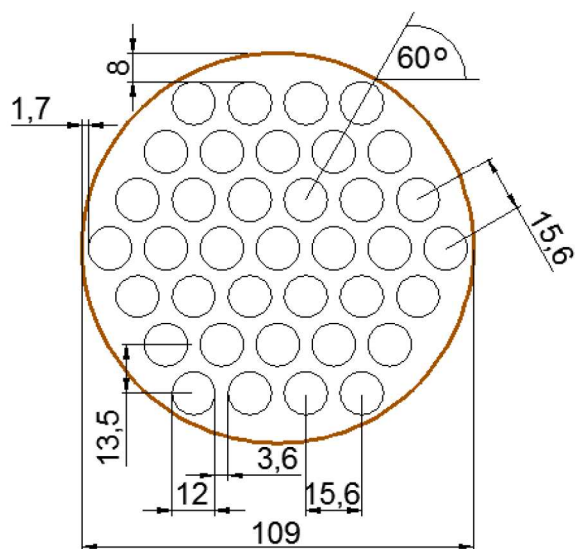


Рис. 1. Поперечный разрез разработанного кожухотрубного теплообменника

Таблица 2

Показатели теплообмена в кожухотрубном теплообменнике

№ п/п	Показатель, обозначение, размерность	Стоки/межтрубное пространство ( $t_1^{cp} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Вода/трубки ( $t_2^{cp} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ )
1	Критерий Прандтля $P_r$	2,765	3,54
2	Удельная теплоемкость $c_p$ , кДж/(кг×К)	4,183	4,174
3	Коэффициент кинематической вязкости $\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$0,447 \times 10^{-6}$	$0,556 \times 10^{-6}$
4	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м×К)	$66,35 \times 10^{-2}$	$64,8 \times 10^{-2}$
5	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	980,5	988,1
6	Критерий Рейнольдса $Re$	12100	11870
7	Критерий Нуссельта $Nu$	61,23	67,06
8	Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ×К)	3385	4295

теплоносителей и поперечным сечением 5×5 м. Поверхность теплообмена состоит из вертикальных оребренных трубок. В трубки направляются стоки, а нагреваемый воздух течет горизонтально в межтрубном пространстве. Учитывая большой расход воздуха и возможность расширения производства, принято решение о выполнении расчетов на максимальный суточный расход сточных вод.

Выполнен конструктивно-поверочный расчет теплообменника на основании предварительных характеристик теплоносителей, представленных в табл. 3.

Теплофизические характеристики стоков приняты такими же, как в предыдущем расчете (табл. 1), что позволило определить утилизируемый тепловой поток:

$$Q_1 = \frac{V_1}{3600} \rho c_p (t_1' - t_1'') =$$

$$= \frac{30}{3600} 980,5 \cdot 4,183 (90 - 40) = 1702 \text{ кВт.}$$

Температура нагретого воздуха при этих параметрах составит:  $t_2'' = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена свидетельствует о необходимости использования в дальнейших расчетах средней логарифмической разности температур [19–21], которая составляет  $\Delta t = 68,12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда средняя температура стоков составляет

$$t_1^{sr} = t_2^{sr} + \Delta t = \frac{-10 + 0}{2} + 68,12 = 63,12 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Корректировка параметров теплоносителя на эту температуру незначительно изменила также величину утилизируемого теплового потока до  $Q_1 = 1703 \text{ кВт}$ .



Рис. 2. Конструкция секции кожухотрубного теплообменника

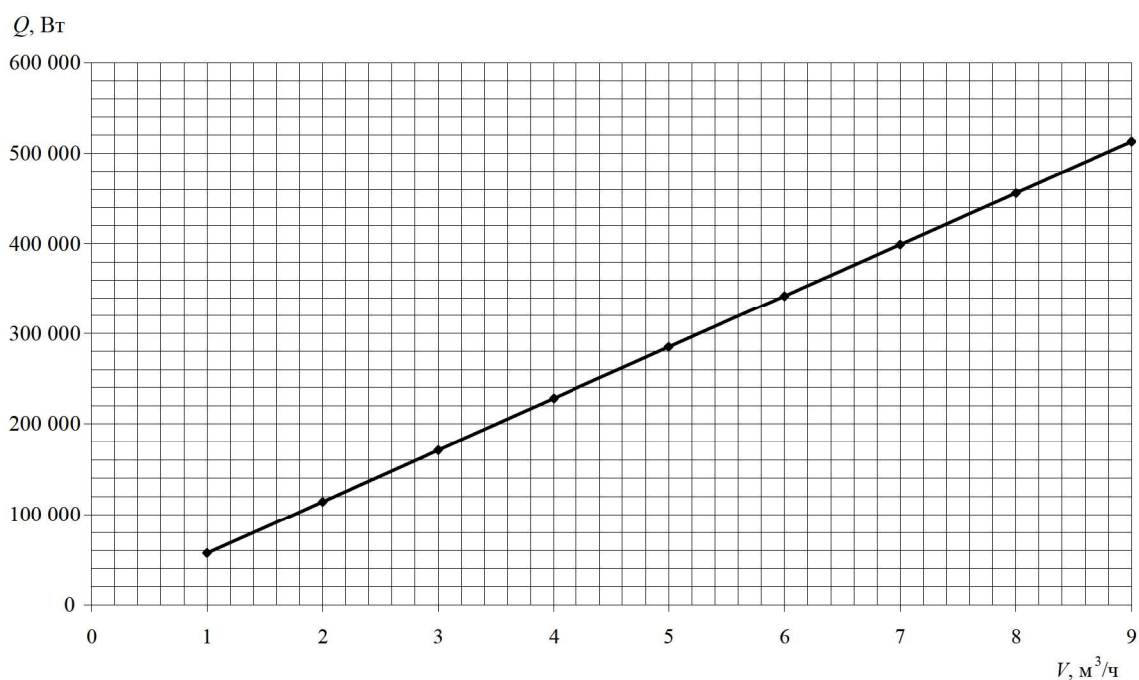


Рис. 3. Зависимость теплового потока одного блока трехсекционного кожухотрубного теплообменника от расхода сточных вод

Конструкция поверхности теплообмена калорифера «стоки–воздух», полученная на основании расчетов, представлена на рис. 4. Для выбранного диаметра вертикальных трубок  $33,7 \times 2$  мм размеры квадратного оребрения составляют  $7,4 \times 7,4$  см. Толщина ребра — 1 мм, а расстояние между осями ребер — 3 мм.

Для такой конструкции действительные скорости течения теплоносителей составляют: для трубного пучка (стоки)  $w_1 = 0,45$  м/с; для межтрубного пространства (воздух)  $w_2 = 14,2$  м/с.

Теплотехнические расчеты выполнены по той же схеме, что и для предыдущего теплообменника [18, 19], с учетом принципиальной разницы в конструкции. Значение коэффициента теплопередачи (при расчете по оребренной поверхности) составило  $15,64$  Вт/( $\text{м}^2 \times \text{К}$ ). Требуемая поверхность оребренных трубок при такой интенсивности теплообмена составила  $1374$   $\text{м}^2$ . Поскольку поверхность одного ряда равна  $1023$   $\text{м}^2$ , было принято решение о двухрядном разме-

щении трубок (см. рис. 4). Такая конструкция калорифера обеспечит в расчетных условиях нагрев воздуха до  $0$   $^{\circ}\text{C}$ , снижая нагрузку на существующий масляный нагреватель до 50 %. С повышением температуры наружного воздуха разработанный воздухонагреватель будет покрывать до 100 % расхода теплоты на вентиляцию котельной.

**Выводы**

Исследована возможность утилизации теплоты технологических сточных

Таблица 3

**Исходные данные для расчета воздухонагревателя**

№ п/п	Показатель	Величина, размерность
1	Расход сточных вод	$V_1 = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$
2	Начальная температура стоков	$t_1' = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3	Ожидаемая температура охлажденных стоков	$t_1'' = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$
4	Начальная температура нагреваемого воздуха	$t_2' = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
5	Расход нагреваемого воздуха	$V_2 = 485 000 \text{ м}^3/\text{ч}$

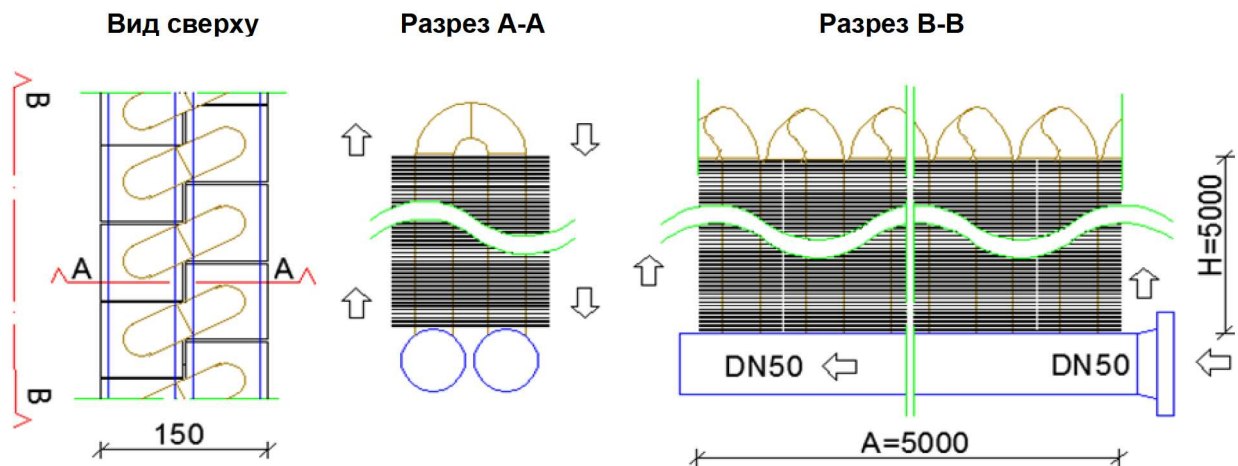


Рис. 4. Теплообменная часть калорифера для утилизации теплоты сточных вод

вод на предприятии Нomanit в г. Карлино, Польша. Для разработки технологии утилизации теплоты выбран цикл термической обработки древесины водяным паром с образованием 8,3 м<sup>3</sup>/ч стоков со средней температурой 90 °С. Дополнительным стимулом исследований была необходимость охлаждения стоков с целью повышения эффективности их предварительной очистки методом центрифугирования. На основании полученных в процессе исследований данных разработано две технологии утилизации теплоты.

Разработан кожухотрубный теплообменник, охлаждающий стоки до необходимой температуры и нагревающий воду на отопительные цели предприятия. Поверхность теплообмена трубного пучка составила около 18 м<sup>2</sup>. Утилизируемый тепловой поток при среднем суточном расходе сточных вод составил 473 кВт.

Разработан также воздухонагреватель системы приточной вентиляции здания котельной, который охлаждает сточные воды до необходимой температуры. Поверхность его теплообмена, состоящая из оребренных трубок, составила 1532 м<sup>2</sup>. Теоретический тепловой поток утилизации потенциала стоков при их максимальном расходе составляет 1703 кВт.

### Библиографический список

1. Андрианов А., Грибков А. Использование тепловой энергии сточных вод // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n7y2023/8523>
2. Delpech B., Axcell B., Jouhara H. A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry, in: International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17). E3S Web Conf. 2017. Vol. 22. DOI: 10.1051/e3sconf/20172200034.
3. Luo Y., et al. A decision support system for waste heat recovery and energy efficiency improvement in data centres. Applied Energy. 2019. 250, pp. 1217–1224.
4. Wodołański A. Znaczenie odzysku ciepła odpadowego z instalacji produkującej dimetyloeter w ochronie środowiska. Rocznik Ochrona Środowiska. 2015. T. 17. S. 1674–1683.
5. Górski J., Matuszewska D. Możliwości pozyskiwania ciepła odpadowego ze ścieków i systemów kanalizacji. Piece Przemysłowe & Kotły. 2013. T. 7–8. S. 21–28.
6. Kosieradzki J. Odzysk ciepła – możliwości i zasady. Rynek instalacyjny. 2009. Nr 3. S. 55–58.
7. Noch T., et al. Analiza emisji zanieczyszczeń w wyniku wytwarzania energii cieplnej. Rocznik ochrony środowiska, 2018. T. 20. S. 1181–1198.
8. Jouhara H., et al. Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress. 2018. Vol. 6. Pp. 268–289.
9. Майоров А., Леухин А., Кулалаева А. Повышение уровня энергосбережения на мясокомбинатах // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 43. С. 1166–1171.
10. Smirnova E., Mamedov Sh., Shkarovskiy A. Predicting the Level of Ecological Safety for Man-made Objects. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Vol. 25. Pp. 74–82.

11. Naik-Dhungel N. Waste heat to power systems. US Environmental Protection Agency. Washington DC, 2012.

12. Thekdi A., Nimbalkar S. Industrial Waste Heat Recovery: Potential Applications, Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2014.

13. Van de Bor D., Infante Ferreira C., Kiss A. Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles. *Energy*. 2015. No 89. Pp. 864–873.

14. Шкарковский А. Л. Экономика строительства. Инвестиционный анализ. СПб.: Лань, 2023. 124 с.

15. Klaric S., Obucina M. New Trends in Engineering Wood Technologies. *New Technologies, Development and Application II*. 2020. Vol. 76. Pp. 712–727.

16. Shkarovskiy A. et al. Use of Eco-friendly Protective Compounds to Increase Crack Resistance of Timber Structures. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2022. Vol. 24. Pp. 74–82.

17. Sun Y., et al. Heat recovery from high temperature slags: a review of chemical methods. *Energies*. 2015. No 8. Pp. 1917–1935.

18. Piotrowski Z. Aparatura ogrzewcza w ciepłownictwie. Warszawa. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1973.

19. Szkarowski A., Pavlenko A., Koshlak A. Zagadnienia wymiany ciepła i masy w inżynierii środowiska. Koszalin. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2017.

20. Szkarowski A., Jaworski Ł., Mamedov Sh. Utilization of Process Wastewater Heat. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2020. V. 22. No 2. Pp. 1074–1083.

21. Orłowska M. Badanie wpływu właściwości termicznych okna na pracę grzejnika w pomieszczeniu – badania numeryczne. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2018. T. 20. S. 1699–1709.

## References

1. Andrianov A., Gribkov A. *Ispol'zovanie teplovoy energii stochnykh vod* [Utilization of thermal energy of waste water]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Bulletin of Don*, 2023, no. 7. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8523>

2. Delpech B., Axcell B., Jouhara H. A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry, in: International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17). *E3S Web Conf.*, 2017, vol. 22. DOI: 10.1051/e3sconf/20172200034.

3. Luo Y., et al. A decision support system for waste heat recovery and energy efficiency improvement in data centres. *Applied Energy*, 2019, no. 250, pp. 1217–1224.

4. Wodolański A. *Znaczenie odzysku ciepła odpadowego z instalacji produkującej dimetyloeter w ochronie środowiska*. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2015, vol. 17, pp. 1674–1683.

5. Górski J., Matuszewska D. Możliwości pozyskiwania ciepła odpadowego ze ścieków i systemów kanalizacji. *Piece Przemysłowe & Kotły*, 2013, vol. 7-8, pp. 21–28.

6. Kosieradzki J. Odzysk ciepła – możliwości i zasady. *Rynek instalacyjny*, 2009, no. 3, pp. 55–58.

7. Noch T., et al. Analiza emisji zanieczyszczeń w wyniku wytwarzania energii cieplnej. *Rocznik ochrony środowiska*, 2018. Vol. 20, pp. 1181–1198.

8. Jouhara H., et al. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018. Vol. 6, pp. 268–289.

9. Mayorov A., Leukhin A., Kulalaeva A. *Povyshenie urovnya energosberezheniya na myasokombinatakh* [Increasing the level of energy saving at meat processing plants]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie – Innovations. Nauka. Education*, 2021, no. 43, pp. 1166–1171.

10. Smirnova E., Mamedov Sh., Shkarovskiy A. Predicting the Level of Ecological Safety for Man-made Objects. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2023. Vol. 25, pp. 74–82.

11. Naik-Dhungel N. Waste heat to power systems. US Environmental Protection Agency. Washington DC, 2012.

12. Thekdi A., Nimbalkar S. Industrial Waste Heat Recovery: Potential Applications, Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2014.

13. Van de Bor D., Infante Ferreira C., Kiss A. Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles. *Energy*, 2015, no. 89, pp. 864–873.

14. Shkarovskiy A. L. *Ekonomika stroitelstva. Investitsionnyy analiz* [Economics of Construction. Investment analysis]. St. Petersburg, Lan Publ., 2023, 124 p.

15. Klaric S., Obucina M. New Trends in Engineering Wood Technologies. *New Technologies, Development and Application*, 2020, vol. 76, pp. 712–727.

16. Shkarovskiy A., et al. Use of Eco-friendly Protective Compounds to Increase Crack Resistance of Timber Structures. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2022, vol. 24, pp. 74–82.

17. Sun Y., et al. Heat recovery from high temperature slags: a review of chemical methods. *Energies*, 2015, no. 8, pp. 1917–1935.

18. Piotrowski Z. *Aparatura ogrzewcza w ciepłownictwie*. Warszawa. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1973.

19. Szkarowski A., Pavlenko A., Koshlak A. *Zagadnienia wymiany ciepła i masy w inżynierii środowiska*. Koszalin, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2017.

20. Szkarowski A., Jaworski Ł., Mamedov Sh. Utilization of Process Wastewater Heat. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2020, vol. 22, no. 2, pp. 1074–1083.

21. Orłowska M. Badanie wpływu właściwości termicznych okna na pracę grzejnika w pomieszczeniu – badania numeryczne. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2018, vol. 20, pp. 1699–1709.