

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВТОРИЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Калинина М.В., Плотникова Л.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

esp_mvkalinina@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) является энергоемкой отраслью со значительными объемами неиспользованных вторичных энергоресурсов (ВЭР), в особенности низкопотенциальной теплоты (40-80°C). В условиях растущих требований к энергоэффективности и экологии рекуперация этих ВЭР из таких источников, как сточная и оборотная вода, вентиляционные выбросы, теплота охлаждения полупродуктов становится не просто перспективным направлением, а насущной необходимостью. Это позволяет сократить расход топлива, потребление энергии и вредные выбросы, повышая тем самым конкурентоспособность предприятий. **ЦЕЛЬ.** Целью исследования является повышение энергетической эффективности сложной промышленной тепло-технологической схемы целлюлозно-бумажного производства с использованием методов структурного и термодинамического анализа. Данные методы анализа позволяют объективно оценить потенциал переработки вторичных энергоресурсов и выбрать наиболее эффективные схемы систем рекуперации ВЭР. **МЕТОДЫ.** Эксергетический анализ выявил значительные неиспользуемые потери теплоты в целлюлозно-бумажном производстве, в частности, в сушильных установках с КПД всего 46.9%. Выявлено, что наибольший потенциал для рекуперации имеют потоки отработанного воздуха, сточных и оборотных вод, верхнего продукта колонн. Их утилизация с помощью теплонасосных установок позволяет существенно повысить энергоэффективность производства, снизив затраты на энергоносители и тепловое загрязнение окружающей среды. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Термодинамический анализ выявил значительные неиспользуемые потери в ключевых потоках производства (отработанный воздух, сточные и оборотные воды, верхний продукт колонн). Разработана система их рекуперации с помощью теплонасосных установок (ТНУ), которая позволяет повысить общий коэффициент использования энергии системы с 17.88% до 92.58%. Внедрение ТНУ обеспечивает существенную экономию тепловой энергии и снижает экологическую нагрузку производства. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Для решения этой проблемы разработана комплексная система рекуперации на основе термотрансформаторов – теплонасосных установок. Ее внедрение позволит утилизировать 10.13 МВт тепловой мощности из сбросных потоков, повысив общую энергоэффективность производства.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажное производство; энергоэффективность; вторичные энергоресурсы; низкопотенциальная теплота; рекуперация тепла; теплонасосные установки; эксергетический анализ; теплотехнологическая схема; энергосбережение; сточные воды; сушильные установки; термодинамический анализ.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2025-458 от 17.01.2025.

Для цитирования: Калинина М.В. Плотникова Л.В. Система комплексной рекуперации низкопотенциальной вторичной энергии в теплотехнологической схеме целлюлозно-бумажного производства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 182-194. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-182-194.

THE SYSTEM OF COMPLEX RECOVERY OF LOW-POTENTIAL SECONDARY ENERGY IN THE THERMAL TECHNOLOGY SCHEME OF PULP AND PAPER PRODUCTION

Kalinina M.V., Plotnikova L.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan Russia

esp_mvkalinina@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. Pulp and paper production is an energy-intensive industry with significant amounts of unused secondary energy resources (REM), especially low-potential heat (40-80°C). In the context of growing energy efficiency and environmental requirements, the recovery of these wind turbines from sources such as wastewater and recycled water, ventilation emissions, and heat cooling of intermediates is becoming not just a promising area, but an urgent necessity. This makes it possible to reduce fuel consumption, energy consumption and harmful emissions, thereby increasing the competitiveness of enterprises. purpose. The aim of the study is to increase the energy efficiency of a complex industrial heat and technological scheme of pulp and paper production using methods of structural and thermodynamic analysis. These analysis methods make it possible to objectively assess the potential of recycling secondary energy resources and select the most effective schemes of wind power recovery systems. METHODS. Exergetic analysis revealed significant unused heat losses in pulp and paper production, in particular, in drying plants with an efficiency of only 46.9%. It has been revealed that the flows of exhaust air, waste and recycled water, and the upper product of the columns have the greatest potential for recovery. Their utilization by means of heat pumping units can significantly increase the energy efficiency of production, reducing energy costs and thermal pollution of the environment. results. Thermodynamic analysis revealed significant unused losses in key production streams (waste air, wastewater and recycled water. the top product of the columns). A system for their recovery using heat pumping units (TNUS) has been developed, which makes it possible to increase the total energy utilization of the system from 17.88% to 92.58%. The introduction of TNW provides significant savings in thermal energy and reduces the environmental burden of production. conclusion. To solve this problem, a comprehensive heat recovery system based on thermal transformers – heat pump installations has been developed. Its implementation will make it possible to utilize 10.13 MW of thermal capacity from waste streams, increasing the overall energy efficiency of production.

Keywords: pulp and paper production; energy efficiency; secondary energy resources; low-potential heat; heat recovery; heat pumping units; exergetic analysis; thermal technology scheme; energy conservation; wastewater; drying units; thermodynamic analysis.

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2025-458 dated January 17, 2025.

For citation: Kalinina M.V., Plotnikova L.V. The system of complex recovery of low-potential secondary energy in the thermal technology scheme of pulp and paper production. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (5): 182-194. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-182-194.

Введение (Introduction) и Литературный обзор (Literature review)

В современной промышленной теплоэнергетике особую значимость приобретает вопрос оптимизации потребления энергоресурсов. Одним из наиболее перспективных путей решения данной проблемы выступает внедрение технологий, направленных на повышение энергоэффективности производственных процессов посредством утилизации вторичных энергетических ресурсов. Это позволяет существенно сократить расход топлива и потребление тепловой и электрической энергии.

В связи с этим возникает острая необходимость в развитии и совершенствовании теоретических подходов к анализу эффективности энергетических процессов, а также в разработке методологических основ для проектирования современного оборудования, способного эффективно рекуперировать вторичные энергоресурсы.

Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) характеризуется высокой энергоемкостью и значительными объемами образующихся вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Особый интерес представляет утилизация низкопотенциальной теплоты, источником которой являются сточные воды, вентиляционные выбросы сушильных отделений, конденсаты и другие потоки с температурой 40-80°C. Эффективная рекуперация таких ВЭР требует системного подхода, объединяющего методы структурного и термодинамического анализа [1].

Организация систем утилизации низкопотенциальных ВЭР на основе системного подхода заключается не в простом добавлении теплоутилизационного оборудования, а в целостном анализе всей теплотехнологической схемы предприятия как единой

энергетической системы. Системный анализ позволяет выявить все источники низкопотенциальных ВЭР (сточные воды, дымовые газы, влажный воздух, конденсат и т.п.), оценить их температурный потенциал, количество и график поступления, а также определить потенциальных потребителей тепла (подогрев технологических растворов, отопление, подпиточная вода для котлов). Ключевой задачей является синтез такой системы рекуперации, которая обеспечит эффективное согласование во времени и по параметрам между нерегулярными, распределенными источниками низкопотенциального тепла и стабильными потребителями, часто требующими более высокого температурного уровня. Этот подход позволяет перейти от локальной утилизации к созданию интегрированной энерготехнологической системы с минимальными эксергетическими потерями [2].

Системный подход к утилизации низкопотенциальных ВЭР изначально получил широкое развитие в энергоемких отраслях, таких как нефтепереработка и нефтехимия. Это связано с рядом факторов:

- высокая энергоемкость процессов. Нефтехимические производства характеризуются большими объемами тепловых потоков на перегонку, крекинг и синтез, что создает значительные объемы вторичных энергоресурсов;
- наличие стандартных источников низкопотенциальных ВЭР. Типичными источниками являются продукты сгорания печей технологических нагревателей, охлаждающая вода с технологических аппаратов, конденсаты пара;
- отработанные технические решения. Для нефтехимии исторически разработаны и коммерциализированы такие решения, как установки утилизации тепла дымовых газов (экономайзеры), теплонасосные установки (ТНУ) для подогрева технологических потоков и системы рекуперации тепла от аппаратов воздушного охлаждения [3].

Исследования, проведенные для нефтехимического комплекса, показали, что интеграция трансформаторов теплоты в виде теплонасосных систем позволяет утилизировать тепло отходящих потоков с температурой 40-70°C для подогрева более холодных потоков до 90-120°C, что существенно снижает нагрузку на первичные энергоисточники. Этот опыт является ценным для разработки аналогичных решений в других отраслях, включая целлюлозно-бумажную промышленность.

Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) обладает уникальным набором особенностей, которые определяют специфику образующихся ВЭР. Оно обладает большим количеством низкопотенциальных потоков. Основными источниками низкопотенциальных ВЭР являются оборотные и сточные воды (30-50°C), теплый воздух от сушильных частей бумагоделательных машин, продукты колонн. Воздух из сушильных секций является разбавленным и имеет высокое влагосодержание, что требует применения методов конденсации влаги с одновременным извлечением тепла. Потоки низкопотенциальных ВЭР рассредоточены по всей территории производства, что усложняет задачу их централизованного сбора и утилизации. Некоторые потоки (например, конденсаты из варочных цехов) могут содержать летучие органические соединения, что требует применения коррозионностойких материалов в теплообменном оборудовании и усложняет процесс рекуперации.

Как отмечается в работе [4], именно низкопотенциальные ВЭР, составляющие значительную долю общих потерь, часто остаются неиспользованными на ЦБП из-за технической и экономической сложности их утилизации традиционными методами.

Для модернизации теплотехнологической схемы ЦБП с целью утилизации низкопотенциальных ВЭР наиболее перспективными являются трансформаторы теплоты, в частности ТНУ, которые позволяют повысить тепловую энергию с низкого температурного уровня на более высокий. В промышленности, включая ЦБП, находят применение следующие варианты ТНУ:

- парокompрессионные ТНУ. Это наиболее распространенный тип. В качестве рабочего тела могут использоваться различные хладагенты (аммиак) и др.). Их эффективность применения на ЦБП исследуется, например, для подогрева технологической воды теплом сточных вод [5]. Аммиак является предпочтительным хладагентом для крупных промышленных установок;
- абсорбционные ТНУ. Эти установки используют термохимический компрессор и приводятся от источника тепла средней температуры (сбросной пар, горячая вода, дымовые газы). Они особенно эффективны в условиях ЦБП, где имеются избытки пара или горячей воды. Могут быть использованы для охлаждения дымовых газов с одновременной генерацией полезного тепла [6];
- каскадные и гибридные системы. Для достижения максимальной эффективности предлагаются комбинированные системы, например, сочетание абсорбционных и

парокомпрессионных ТНУ, или интеграция ТНУ с тепловыми насосами, использующими в качестве рабочего тела влажный воздух (эжекторные или компрессионные термотрансформаторы) [7, 8].

Исследования, проведенные авторами, показывают, что внедрение таких систем на ЦБП позволяет не только значительно сократить расход топлива и выбросы парниковых газов, но и повысить надежность энергоснабжения предприятия за счет создания замкнутых тепловых контуров.

Таким образом, создание системы комплексной рекуперации низкопотенциальных ВЭР (НВЭР) в теплотехнологической схеме ЦБП является сложной, но экономически и экологически необходимой задачей. Ее успешное решение лежит на пути применения системного анализа, учета уникальных особенностей потоков ЦБП и широкого внедрения современных технологий, среди которых ключевую роль играют различные типы теплонасосных установок, адаптированные к условиям целлюлозно-бумажного производства.

Научная значимость исследования состоит в разработке системного подхода и методологии интеграции теплонасосных систем для рекуперации низкопотенциальной теплоты в целлюлозно-бумажном производстве, что позволяет создать энергоэффективные технологические схемы с минимальными потерями.

Практическая значимость исследования состоит в снижении затрат на топливо и энергию, уменьшении выбросов, повышении надежности энергоснабжения предприятий за счет внедрения теплонасосных установок и утилизации ранее неиспользуемых НВЭР.

Методика (Methodology)

Структурный анализ как этап системного анализа позволяет выявить взаимозависимости между элементами, определить замкнутые и разомкнутые последовательности, а также оптимизировать расчёт сложной многоконтурной системы с целью снижения ошибки при определении параметров ВЭР из-за неоднозначности и недостаточности исходных данных о параметрах энергетических и технологических потоков схемы. Это важный этап для понимания того, как энергетические потоки взаимодействуют в системе и где возникают основные потери.

Термодинамический анализ, основанный на применении эксергетического метода, позволяет оценить степень термодинамического несовершенства исследуемой системы, выявить потери от необратимости для всей системы и элементов, произвести оценку эффективности элементов в составе системы, определить величину технически работоспособной энергии.

Эксергия – это термодинамическая величина, которая характеризует полезную работу, которую можно получить от системы при её приведении в равновесие с окружающей средой. В отличие от энергии, эксергия учитывает не только количество, но и качество энергии.

Запишем формулу для определения термомеханической эксергии однородного вещества:

$$\Delta e = i_1 - i_0 - T_0(s_1 - s_0)$$

где:

- i_1, s_1 – энтальпия и энтропия в рабочем состоянии,
- i_0, s_0 – энтальпия и энтропия в состоянии окружающей среды,
- T_0 – температура окружающей среды.

Для теплового потока эксергия рассчитывается как:

$$e_q = Q \cdot (1 - (T_0/T)),$$

где T – средняя температура теплового потока.

Несмотря на высокие энергозатраты целлюлозно-бумажной промышленности, потенциал низкопотенциальных вторичных энергоресурсов (ВЭР) используется не в полной мере [9]. Анализ термодинамической эффективности всей технологической схемы производства бумаги показал, какие сбросные потоки обладают наибольшим потенциалом для утилизации. Использование этих потоков в ТНУ [10-12] позволяет организовать систему рекуперации ВЭР, что ведет к их повторному применению и снижению нагрузки на окружающую среду.

В результате эксергетического анализа были выявлены потоки с наибольшей эксергетической мощностью, которые в настоящее время используются неэффективно или теряются.

Основная задача анализа структуры внутренних и внешних связей состоит в установлении взаимозависимостей между элементами внутри теплотехнологической схемы и определении оптимальной последовательности ее расчета.

Проведение же анализа структуры связей (структурного анализа) позволяет выявить зависимости между элементами схемы, выделить замкнутые и разомкнутые последовательности элементов, определить оптимальную последовательность ее расчета с минимизацией итераций [13-15].

Фрагмент структурной схемы представлен на рисунке 1, включающей 166 единиц теплообменного, разделительного и вспомогательного оборудования.

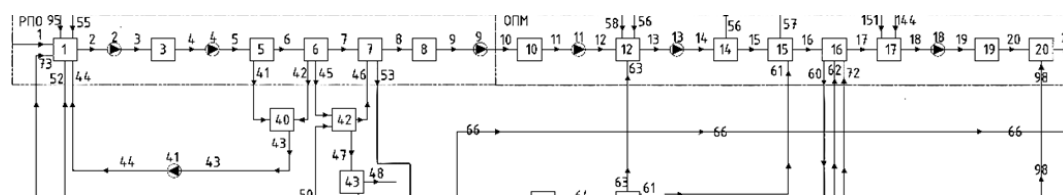


Рис. 1. Структурная схема (фрагмент) для размольно-подготовительного участка теплотехнологической схемы ЦБП: число в квадрате – номер элемента в структурной схеме; 1 – гидроразбавитель; 2, 4, 9, 41 – насосы; 3, 8, 40 – бассейны; 5 – вихревой очиститель; 6, 42 – сепаратор; 7 – сгуститель; 43 – вибросортировка; РПО – размольно-подготовительный отдел

Fig. 1. Block diagram (fragment) for the grinding and preparatory section of the thermal technological scheme of the CBP: the number squared is the number of the element in the block diagram; 1 – hydraulic diluent; 2, 4, 9, 41 – pumps; 3, 8, 40 – pools; 5 – vortex cleaner; 6, 42 – separator; 7 – thickener; 43 – vibration sorting; RPO – grinding and preparatory department

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

Утилизация потоков с высокой эксергетической мощностью позволяет повысить энергоэффективность теплотехнологической схемы производства бумаги, снизить затраты на энергоносители и уменьшить тепловые потери. Наибольшие потери эксергии выявлены в сушильных установках КДМ (элементы 34-37), где эксергетический КПД составляет всего 46,9%. Эти аппараты являются основными потребителями тепловой энергии и имеют значительный потенциал для повышения эффективности энергопотребления за счет утилизации вторичных энергоресурсов.

Поток 117 (отработанный теплый воздух) предлагается направить в ТНУ для подогрева сухого воздуха, подаваемого в сушильные камеры. Это позволит сократить расход пара на технологический процесс сушки.

Поток 85 (оборотная вода) с более низким температурным потенциалом может быть направлен на подогрев свежей воды для технологических нужд, в системы вентиляции, отопления вспомогательных помещений.

Поток 197 (сточная вода) при вторичном использовании направляется из прудов-отстойников в технологический цикл для использования в различных процессах размольно-подготовительного отдела (для роспуска макулатуры и разбавления массы), в цеху первичного полуфабриката, на промывку щепы в варочно-промывном отделе; вторичная же ее энергия предлагается к использованию в системе охлаждения оборудования и на нужды горячего водоснабжения.

Поток 253 (верхний продукт колонн). В процессах разделения при производстве спирта вариантом включения теплового насоса является использование энергии верхнего продукта колонн для подогрева нижней части – куба колонн. Производство спирта сопровождается выходом большого количества теплой воды после конденсации водно-спиртовых паров в дефлегматорах. Эту воду можно использовать для подогрева самой колонны, то есть предлагается прямая рекуперация тепла от верхнего продукта колонн для подогрева нижней части через ТНУ.

Результаты расчетов (Calculation results)

Анализ производственной схемы показал наличие сотен контуров и минимально необходимое число разрываемых потоков – 20 (включая ключевой №24). Термодинамический анализ выявил значительные потери тепла и эксергии в отработанном воздухе бумагоделательных машин (рис. 2) и теплой воде после охлаждения щелоков.

В таблице 1 представлены расчеты потенциала для следующих потоков: воздух 117 от сушильных установок 34-37, обратная вода 85 в бассейне подсеточной воды 54, верхний продукт колонны 253 и сточные воды 197. Также был определен расход энергоносителя, который может быть получен за счет ВЭР, поскольку при создании системы рекуперации критически важно точно оценить объем замещающего энергоресурса.

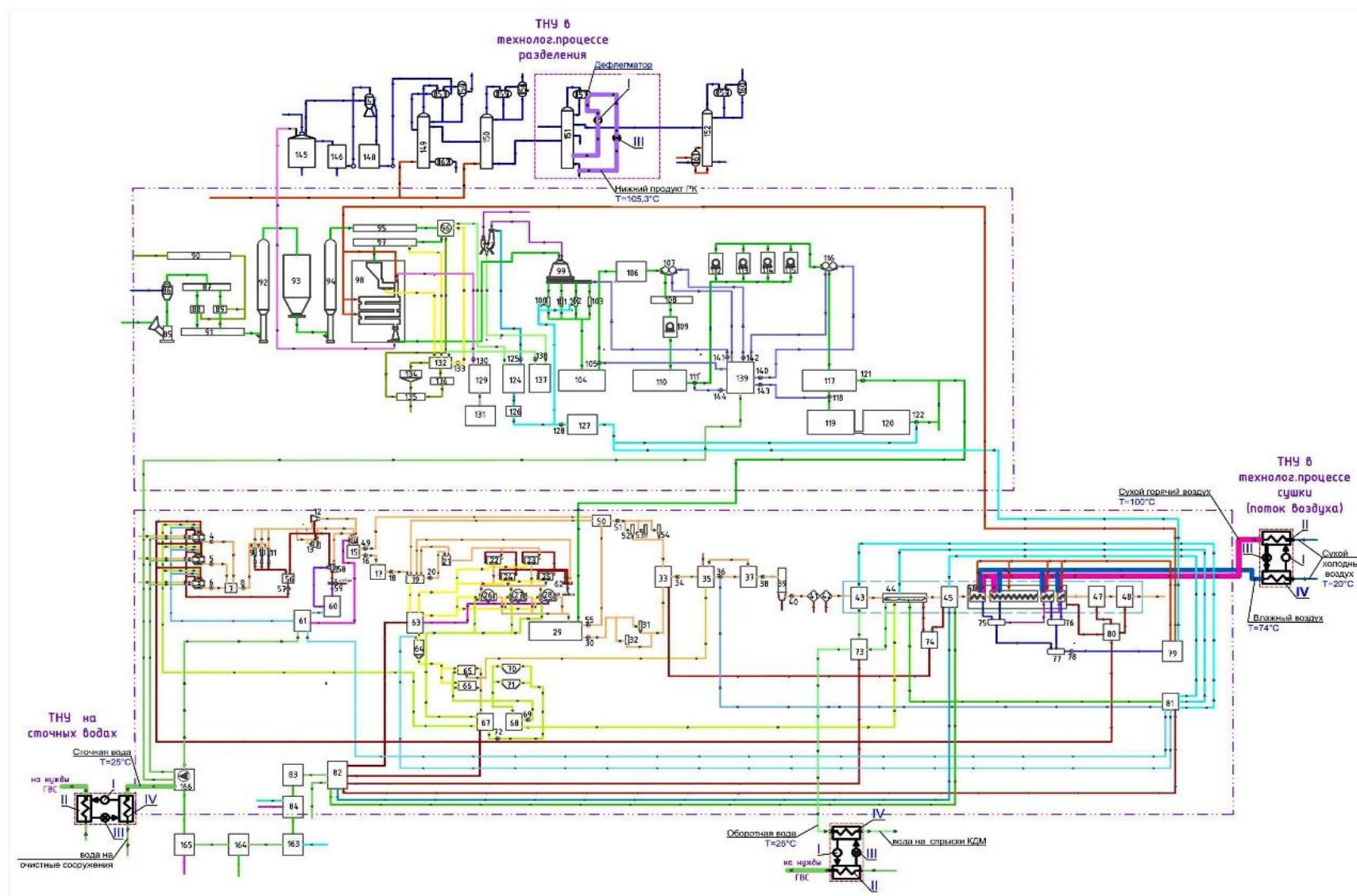


Рис. 2. Технологическая схема производства бумаги с включением ТНУ

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

Fig. 2. Technological scheme of paper production including TNU

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета термодинамического потенциала потоков вторичных энергетических ресурсов

The results of calculating the thermodynamic potential of secondary energy resources flows

№ потока	85	117	197	253	Итого
Тепловая мощность, отведенная $Q_{отв}$, кВт	20783,68	8089,98	663,47	1357,14	30894,27
Эксергетическая мощность, отведенная $E_{отв}$, кВт	1749,12	1620,33	45,64	237,95	3653,04
Принимаемая в утилизационном аппарате тепловая мощность, $Q_{пол}$, кВт	3454,31	5057,16	264,77	1357,14	10133,38
Принимаемая в утилизационном аппарате эксергетическая мощность, $E_{пол}$, кВт	557,00	1459,89	31,11	237,95	2285,95
Вид используемого потока	оборотная вода	теплый воздух	сточные воды	продукт колонн	

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

На рисунке 2 изображена технологическая схема производства бумаги с указанием мест установки теплонасосных установок. Расчеты тепловых и эксергетических показателей для всех аппаратов показали, что максимальный достижимый тепловой КПД составляет 92,58%, а эксергетический – 83,51%. Фактические значения коэффициента системного использования (КСИ) вторичных энергоресурсов (ВЭР) достигли 20,7% и 17,88% соответственно. Анализ выявил, что значительный потенциал для повышения энергоэффективности заложен в потоках, сбрасываемых в окружающую среду: это воздух из сушильных установок (№34-37), теплота охлаждения верхнего продукта колонн, а также сточные и оборотные воды. Их утилизация с помощью теплонасосных установок (ТНУ) для рекуперации низкопотенциальных ВЭР позволит полезно использовать данные тепловые потери.

Интеграция теплонасосной установки (рис. 3) в контур оборотной воды позволяет стабилизировать технологические параметры производства, нарастить объемы выпуска продукции и снизить экологическую нагрузку от картоноделательной машины (КДМ) на рассматриваемом целлюлозно-бумажном производстве.

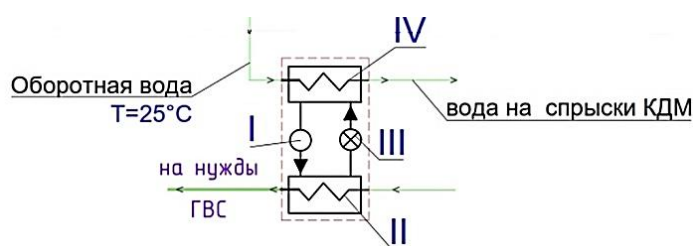


Рис. 3. Включение ТНУ в схему циркуляции оборотной воды: I – компрессор, II – конденсатор, III – дроссельный клапан, IV – испаритель
Fig. 3. Inclusion of TNCs in the circulating water circuit: I – compressor, II – condenser, III – throttle valve, IV – evaporator

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

В процессе сушки воздуха важно, чтобы он был подогрет. С использованием потенциала отработанного воздуха возможно снизить затраты теплоты на процесс подогрева воздуха. В свою очередь потенциал отработанного воздуха, предложено повысить в тепловом насосе (рис. 4). Холодный воздух поступает в конденсатор теплового насоса, где он нагревается за счет теплоты отработанного воздуха и направляется в сушильную камеру.

В качестве низкопотенциального источника тепла для ТНУ используется отработанный влажный воздух, выходящий из сушильной камеры. Он имеет повышенную

температуру, но обычно это тепло не утилизируется. На рисунке 4 же предложена утилизация тепловых отходов (отработанного воздуха), что повышает общий КПД системы.

Таким образом, ТНУ позволяет вернуть часть теплоты, теряемую с отработанным воздухом и повторно использовать его в основном технологическом процессе, повышая энергоэффективность сушки.

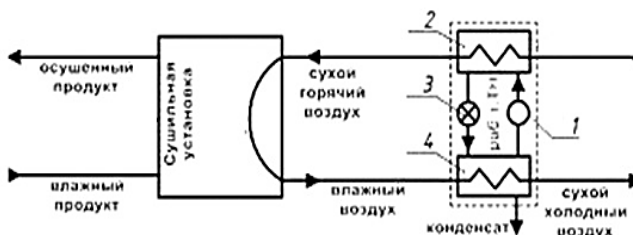


Рис. 4. Включение ТНУ в технологические процессы сушки: схема включения термотрансформатора; 1 – компрессор, 2 – конденсатор; 3 – дроссельный клапан; 4 – испаритель; раб.т. ТН – рабочее тело теплового насоса

Fig. 4. Inclusion of TNCs in the technological processes of drying: circuit diagram of the thermal transformer; 1 – compressor, 2 – condenser; 3 – throttle valve; 4 – evaporator; working fluid of the heat pump

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

Включение ТНУ в технологический процесс с использованием сточных вод цеха первичного полуфабриката позволяет создать классическую схему отбора теплоты низкопотенциального источника энергии и направления в систему отопления и ГВС (рис. 5). В качестве низкопотенциального источника тепла выступают сточные воды цеха первичного полуфабриката. Эти воды, являясь побочным продуктом производства, имеют повышенную температуру, и их тепло обычно безвозвратно теряется. В предлагаемой схеме сточные воды проходят через испаритель (1.4) ТНУ, где охлаждаются, отдавая свое тепло циркулирующему хладагенту. Компрессор (1.1) сжимает хладагент, значительно повышая его температуру. В конденсаторе (1.2) горячий хладагент отдает эту теплоту потоку воды, которая циркулирует в системе отопления и/или горячего водоснабжения (ГВС). Производится нагрев воды для системы отопления и ГВС предприятия.

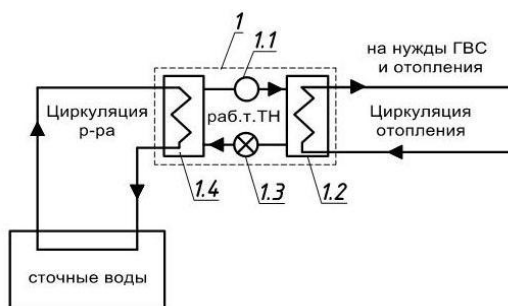


Рис. 5. Включение ТНУ в процесс очистки сточных вод: 1.1 – компрессор, 1.2 – конденсатор, 1.3 – дроссельный клапан, 1.4 – испаритель

Fig. 5. Inclusion of TNCs in the wastewater treatment process: 1.1 – compressor, 1.2 – condenser, 1.3 – throttle valve, 1.4 – evaporator

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

Таким образом, утилизируется бросовое тепло от сточных вод, которое в противном случае просто сбрасывалось бы в окружающую среду. Снижается потребление основного топлива (газа, мазута и т.д.) для целей отопления и ГВС.

Данное решение позволяет превратить теплые сточные воды в энергетический ресурс, сокращая затраты на теплоносители и уменьшая тепловое загрязнение окружающей среды.

Также для экономии энергии в спиртовом производстве предложено использовать теплоту паров, выходящих с верха ректификационной колонны, для подогрева её нижней части. Согласно схеме на рисунке 6, предложение реализуется с помощью теплового насоса (выбрана энергоэффективная схема ТНУ открытого типа).

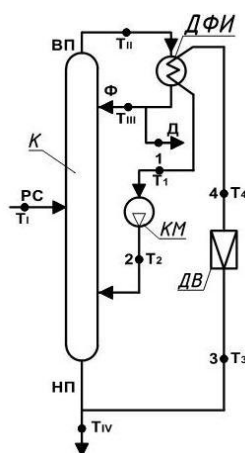


Рис. 6. Ректификационная колонна с ТНУ: К – ректификационная колонна; ДФИ – дефлегматор; 3 – дроссельный вентиль; 4 – компрессор
 Fig. 6. Rectification column with TNU: K – distillation column; DFI – deflector; 3 – throttle valve; 4 – compressor
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве источника теплоты для ТНУ используются водно-спиртовые пары (верхний продукт), выходящие из ректификационной колонны. Эти пары обладают значительной скрытой теплотой конденсации, которая обычно отводится в дефлегматоре и теряется с охлаждающей водой либо уходит с воздухом в окружающую среду в случае использования в качестве охладителей воздушных холодильников. В предлагаемой схеме энергия паров верхнего продукта колонн направляется в испаритель ТНУ (роль которого играет дефлегматор ДФИ), где они конденсируются, отдавая свое тепло хладагенту (роль которого играет нижний продукт колонн). Хладагент испаряется и далее сжимается в компрессоре, что повышает его температуру. Сжатый горячий хладагент поступает в конденсатор, который встроен в нижнюю часть (куб) колонны. В конденсаторе хладагент отдает тепло кубовой жидкости (нижнему потоку), которая является основным потребителем тепла в процессе ректификации.

Тепло, необходимое для кипячения кубовой жидкости, частично или полностью обеспечивается за счет утилизации тепла паров верхнего продукта. Снижается нагрузка на основную греющую систему колонны (котел, паровой подогрев). Повышается энергетическая автономность процесса разделения, что ведет к значительной экономии энергоресурсов. Это решение замыкает энергетический контур внутри технологической установки, используя отводимую теплоту для покрытия собственных потребностей процесса, что является ярким примером глубокой энергоэффективности.

Таким образом, разработана система рекуперации низкопотенциальных ВЭР целлюлозно-бумажного производства с применением ТНУ на сточной и оборотной воде, теплоте отходящего воздуха и конденсации водно-спиртовых паров (табл. 2).

Таблица 2
 Table 2

Сравнительная характеристика вариантов включения ТНУ в производство
 Comparative characteristics of options for including TNCs in production

Варианты	1	2	3	4
Источник сбросной энергии	Сточные воды	Оборотная вода	Теплая вода при конденсации водно-спиртовых паров	Теплота уходящего воздуха бумагоделательной машины
Температура источника вторичной энергии, °С	25-35	34-38	64-73	40-74
Потребитель вторичной энергии	Технологические процессы	Горячее водоснабжение	Технологические процессы	Технологические процессы
Температура нагреваемого потока, °С	45	55	110	110

Продолжение таблицы 2

Схема ТНУ	Парокомпрессионный закрытого типа	Парокомпрессионный закрытого типа	Парокомпрессионный открытого типа	Парокомпрессионный закрытого типа
Коэффициент трансформации μ	3,02	3,06	5,12	2,85
Эксергетический КПД $\eta_{\text{э}}$	0,1	0,15	0,52	0,303
Кол-во сэкономленной тепловой энергии, кВт	361,1	536,4	783,14	3126,0
Экономия тепловой энергии, т/год	382,3	576,23	843,06	3369,65
Тепловой КСИ системы после утилизации одного из потоков ВЭР (относительно 17,88%)	28,5 %	42,3 %	20,7 %	45,9 %
Тепловой КСИ системы после утилизации всех потоков ВЭР	92,58 %			

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

Варианты модернизации повышают тепловой КСИ системы с 17,88% до 61,8%, 20,7% и 45,9% соответственно. Внедрение всех перечисленных теплонасосных установок позволяет поднять тепловой КСИ до уровня теплового КПД.

Заключение (Conclusion)

ЦБП было рассмотрено как объект структурно-термодинамического анализа, была проведена оценка термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги на основе выявленной оптимальной последовательности расчета. Для анализа термодинамической эффективности основными источниками информации стали теплотехнологическая схема производства бумаги и параметры материальных и энергетических потоков – температура, давление, расход, состав, тепловая и эксергетические мощности.

Были составлены тепловые и эксергетические балансы каждого элемента, групп элементов/блоков и всей теплотехнологической схемы в целом. Рассчитаны тепловые и эксергетические КПД. Наибольшие потери эксергии наблюдаются в сушильных установках КДМ (элементы 34-37), где эксергетический КПД составляет всего 46,9%. Так максимально достижимый тепловой КПД составил 92,58%, эксергетический – 83,51%. Определен тепловой и эксергетический коэффициенты системного использования (КСИ), отражающие реальное использование ВЭР – 20,7% 17,88%.

Выявлено, что среди отведенных потоков часть представляет собой потоки, сбрасываемые в окружающую среду, т.е. тепловые потери, которые можно полезно использовать и потери, которые невозможно использовать в системе.

Разработана система комплексной рекуперации низкопотенциальной вторичной энергии в теплотехнологической схеме ЦБП.

Система комплексной рекуперации низкопотенциальных ВЭР целлюлозно-бумажного производства с ТНУ на сточной и оборотной воде, теплоте уходящего воздуха бумагоделательной машины, теплоте при конденсации водно-спиртовых паров позволила выявить потоки для включения в систему утилизации сбросной энергии для целлюлозно-бумажного производства с общей возможной к принятию тепловой мощностью 10,13 МВт в виде теплоты охлаждения полупродуктов, теплоты отработанного воздуха, теплоты сточных вод и 2,29 МВт эксергии соответствующих потоков.

Литература

1. Шелгинский Е. А. Полезное использование ВЭР в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. – С. 578-580. – EDN GLSDRL.
2. Плотникова Л.В., Торкунова Ю.В. Программное обеспечение системного анализа сложноструктурированных промышленных комплексов при разработке энергосберегающих мероприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). – С. 140-154.
3. Рекуперация и аккумулирование вторичных энергетических ресурсов на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса / Ю. В. Ваньков, Л. В. Плотникова, Ш. Г. Зиганшин, А. Р. Загретдинов. – Санкт-Петербург: Издательство «Наукоемкие технологии», 2024. – 142 с. – ISBN 978-5-907804-203. – EDN QDKPAB.
4. Шелгинский Е. А. Анализ эффективности использования тепловых ВЭР на основе органического цикла Ренкина в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский, А. Я. Шелгинский // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 90-95. – DOI 10.24223/1999-5555-2022-15-2-90-95. – EDN DAYIVO.
5. Шелгинский Е. А. Анализ и расчет схемы утилизации теплоты ВЭР в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2025. – С. 765. – EDN MJGVFA.
6. Шелгинский Е. А. Полезное использование ВЭР в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. – С. 578-580. – EDN GLSDRL.
7. Бу Дакка Б. Рекуперация тепла с использованием органического цикла Ренкина / Б. Бу Дакка, И. А. Султангузин, Ю. В. Яворовский // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2021. – № 5. – С. 51-57. – DOI 10.24160/1993-6982-2021-5-51-57. – EDN EBEZWU.
8. Повышение энергетической и экологической эффективности теплоэлектроцентрали на основе применения абсорбционных трансформаторов теплоты / Ю. В. Яворовский, И. А. Султангузин, А. И. Бартенев [и др.] // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2020. – № 4. – С. 89-97. – DOI 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97. – EDN BBYBWC.
9. Скобелев Д.О. Формирование инфраструктуры ресурсно-технологической трансформации промышленности. Экономика устойчивого развития. - 2020. № 1. - с. 162-167.
10. Плотникова Л.В., Калинина М.В. Структурно-термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025;27(3):218-232. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232>.
11. V. P. Meshalkin, T. N. Gartman, T. A. Kokhov, L. B. Korelstein. Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. Doklady Chemistry. – 2018. – Vol. 482, No. 2. – P. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.
12. Чахирев, Л. В. Использование программного обеспечения системного анализа для управления энергоэффективностью и структурой энергетических систем / Л. В. Чахирев, В. В. Плотников, Л. В. Плотникова // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 92-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко, Казань, 21–26 сентября 2020 года / Ответственный редактор Н.И. Воропай. Том Выпуск 71. Книга 3. – Казань: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2020. – С. 90-99. – EDN DZTVVF.
13. Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24(4):178-191. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.
14. Назмеев, Ю. Г. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности / Ю. Г. Назмеев, И. А. Конахина. – М.: Московский энергетический институт, 2001. – 364 с. – ISBN 5-7046-0698-9. – EDN XGNUVV.
15. Красавина Е.О., Плотникова Л.В. Энергосберегающий тепловой насос в системах промышленного разделения веществ // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2016, № 4 (32), С. 95-105.

Авторы публикации

Калинина Марина Владимировна – ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8005-312X>. esp_mvkalinina@mail.ru

Плотникова Людмила Валерьяновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7215-8152> mikhailovalv@mail.ru

References

1. Shelginsky, E. A. Useful use of VER in the production of nitric acid. E. A. Shelginsky, Yu. V. Yavorovsky. Intensification of heat and mass transfer processes, industrial safety and ecology : Proceedings of the VI All-Russian Student Scientific and Technical Conference, Kazan, May 24-26, 2022. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2022. pp. 578-580. EDN GLSDRL.
2. Plotnikova L.V., Torkunova Yu.V. Software for system analysis of complex-structured industrial complexes in the development of energy-saving measures. Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2022. Vol. 14. No. 1 (53). – pp. 140-154.
3. Recovery and accumulation of secondary energy resources at the enterprises of the oil refining complex. Yu. V. Vankov, L. V. Plotnikova, Sh. G. Ziganshin, A. R. Zagretidinov. – Saint Petersburg: Science-intensive Technologies Publishing House, 2024. – 142 p. - ISBN 978-5-907804-203. – EDN QDKPAB. Lykov A.V. Heat and mass transfer. Moscow: Energiya, 1971. 324 p.
4. Shelginsky E. A., Yavorovsky Yu.V., Shelginsky A. Ya. Analysis of the efficiency of using thermal power plants based on the organic Rankine cycle in the production of nitric acid. Reliability and safety of energy. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 90-95. – DOI 10.24223/1999-5555-2022-15-2-90-95. – EDN DAYIVO.
5. Shelginsky, E. A. Analysis and calculation of the heat recovery scheme of VER in the production of nitric acid. E. A. Shelginsky, Yu. V. Yavorovsky. Radioelectronics, electrical engineering and power engineering : Abstracts of the Thirty-first International Scientific and Technical Students and postgraduates, Moscow, March 13-15, 2025. – Moscow: Raduga Center for Printing Services, LLC, 2025. – p. 765. – EDN MJGVFA.
6. Shelginsky, E. A. Useful use of VER in the production of nitric acid. E. A. Shelginsky, Yu.V. Yavorovsky. Intensification of heat and mass transfer processes, industrial safety and ecology : Proceedings of the VI All-Russian Student Scientific and Technical Conference, Kazan, May 24-26, 2022. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2022. pp. 578-580. EDN GLSDRL.
7. Bu Dhaka, B. Heat recovery using the Rankine organic cycle. B. Bu Dhaka, I. A. Sultanguzin, Yu. V. Yavorovsky. Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the Moscow Institute of Energy. – 2021. – No. 5. – pp. 51-57. – DOI 10.24160/1993-6982-2021-5-51-57. – EDN EBEZUW.
8. Improving the energy and environmental efficiency of a thermal power plant based on the use of absorption heat transformers. Yu. V. Yavorovsky, I. A. Sultanguzin, A. I. Bartenev [et al.]. Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the Moscow Institute of Energy, 2020, No. 4, pp. 89-97. DOI 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97. EDN BBYBWC.
9. Skobelev D.O. Formation of the infrastructure of resource and technological transformation of industry. Economics of sustainable development. - 2020. No. 1. -pp. 162-167.
10. Plotnikova L.V., Kalinina M.V. Structural and thermodynamic analysis of the thermal technology scheme of pulp and paper production. News of higher educational institutions. Energy problems. 2025;27(3):218-232. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232>
11. V. P. Meshalkin, T. N. Gartman, T. A. Kokhov, L. B. Korelstein. Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. Doklady Chemistry. – 2018. – Vol. 482, No. 2. – P. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.
12. Chakhirev, L. V. The use of system analysis software for energy efficiency management and the structure of energy systems. L. V. Chakhirev, V. V. Plotnikov, L. V. Plotnikova. Methodological issues of reliability research of large energy systems : Proceedings of the 92nd meeting of the International Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko, Kazan, September 21-26, 2020. The responsible editor is N.I. Voropai. Volume Issue 71. Book 3. Kazan: Federal State Budgetary Institution of Science, L.A. Institute of Energy Systems. Melentyev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020, pp. 90-99. – EDN DZTVVF.
13. Lukanin P.V., Kazakov V.G., Zverev L.O. The concept of modernization of energy technology complexes in the Central industrial complex. News of higher educational institutions. Energy problems. 2022;24(4):178-191. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.

14. Nazmееv, Yu.G. Organization of energy technology complexes in the petrochemical industry / Yu.G. Nazmееv, I. A. Konakhina. – М.: Moscow Power Engineering Institute, 2001. – 364 p. – ISBN 5-7046-0698-9. – EDN XGNUVV.

15. Krasavina E.O., Plotnikova L.V. Energy-saving heat pump in industrial separation systems. Bulletin of Kazan State Power Engineering University, 2016, No. 4 (32), pp. 95-105.

Authors of publication

Marina V. Kalinila – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0009-0006-8005-312X>. esp_mvkalinina@mail.ru

Lyudmila V. Plotnikova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-7215-8152>. mikhailovalv@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **21.08.2025 г.**

Отредактировано **13.09.2025 г.**

Принято **10.10.2025 г.**