



СТРУКТУРНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Плотникова Л.В., Калинина М.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

mikhailovalv@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Сложность структуры предприятий целлюлозно-бумажной отрасли промышленности определяется большим количеством элементов в составе теплотехнологических схем производства, обратными потоками, связями с окружающей средой в виде потребляемых топливно-энергетических ресурсов и сбросной энергии в виде вторичных энергетических ресурсов. Для таких предприятий вариантов повышения энергоэффективности с включением энергосберегающего оборудования может быть множество. Поэтому для выбора эффективного варианта предложено использование структурно-термодинамического подхода к анализу теплотехнологических схем.

ЦЕЛЬ. Разработка алгоритма структурно-термодинамического анализа, позволяющего преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей, данные о которых зачастую отсутствуют на целлюлозно-бумажных производствах, но являются необходимыми для оценки термодинамической эффективности использования сбросной энергии.

МЕТОДЫ. Для достижения обозначенной цели используется системный подход с применением матричного анализа и булевой алгебры, эксергетический метод термодинамического анализа, а также разработано программное обеспечение, объединяющее перечисленные методы.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Для теплотехнологической схемы производства бумаги определена оптимальная последовательность термодинамического расчета с минимальным количеством итераций/допущений на участках условного разрыва потоков схемы. В результате термодинамического анализа получены данные о тепловой и эксергетической эффективности элементов теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства, а также данные о потоках, использование которых обеспечит организацию оптимальной системы утилизации вторичной энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанное программное обеспечение структурно-термодинамического анализа было реализовано при оценке термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги. Выявлено минимальное количество потоков схемы – 20 потоков, условный разрыв которых позволяет полностью выполнить термодинамический расчет схемы с минимальным количеством итераций и определить достоверные значения параметров энергетических потоков. Результаты термодинамического анализа показали, что наиболее низкий эксергетический к.п.д – у аппаратов с такими сбрасываемыми потоками как теплота охлаждения верхнего продукта колонн, отработанного воздуха после процесса сушки в бумагоделательной машине, оборотной воды, сточных вод. Поэтому именно в такие аппараты следует осуществлять возврат энергии сбросных потоков наибольшего эксергетического потенциала для повышения термодинамической эффективности теплотехнологической схемы в целом.

Ключевые слова: структурный анализ; обратная связь; итерация; термодинамический анализ; эксергия; энергоэффективность; вторичные энергоресурсы; теплотехнологическая схема; целлюлозно-бумажное производство; процесс сушки.

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: Плотникова Л.В., Калинина М.В. Структурно-термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 218 -232. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232.

STRUCTURAL AND THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE THERMAL TECHNOLOGY SCHEME OF PULP AND PAPER PRODUCTION

Plotnikova L.V., Kalinina M.V.
Kazan State Power Engineering University, Kazan Russia
mikhailovalv@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The complexity of the structure of enterprises in the pulp and paper industry is determined by the large number of elements in the thermal technology schemes of production, reverse flows, connections with the environment in the form of consumed fuel and energy resources and waste energy in the form of secondary energy resources. For such enterprises, there may be many options for improving energy efficiency with the inclusion of energy-saving equipment. Therefore, the use of a structural and thermodynamic approach to the analysis of thermal technology schemes is proposed to select an effective option. *purpose.* Development of an algorithm for structural and thermodynamic analysis, which makes it possible to overcome the ambiguity of the initial data and calculate reliable values of the parameters of external energy sources, data on which are often not available in pulp and paper industries, but are necessary to assess the thermodynamic efficiency of waste energy use. *METHODS.* To achieve this goal, a systematic approach is used using matrix analysis and Boolean algebra, the exergetic method of thermodynamic analysis, and software has been developed that combines these methods. *results.* For the thermal technology scheme of paper production, the optimal sequence of thermodynamic calculations with a minimum number of iterations/assumptions in the sections of the conditional flow gap of the scheme has been determined. As a result of the thermodynamic analysis, data were obtained on the thermal and exergetic efficiency of the elements of the thermal technology scheme of pulp and paper production, as well as data on flows, the use of which will ensure the organization of an optimal system for recycling secondary energy. *Conclusion.* The developed software for structural and thermodynamic analysis was implemented to evaluate the thermodynamic efficiency of the thermal technology scheme of paper production. The minimum number of flows of the scheme has been revealed – 20 flows, the conditional break of which makes it possible to fully perform the thermodynamic calculation of the scheme with a minimum number of iterations and determine reliable values of the energy flow parameters. The results of the thermodynamic analysis showed that the lowest exergetic efficiency is for devices with such discharge flows as the heat of cooling of the upper product of the columns, exhaust air after the drying process in a paper machine, recycled water, and wastewater. Therefore, it is in such devices that the energy of the discharge streams of the greatest exergetic potential should be returned to increase the thermodynamic efficiency of the heat technology scheme as a whole.

Keywords: structural analysis; feedback; iteration; thermodynamic analysis; exergy; energy efficiency; secondary energy resources; thermal technology scheme; pulp and paper production; drying process.

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: Plotnikova L.V., Kalinina M.V. Structural and thermodynamic analysis of the thermal technology scheme of pulp and paper production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 218-232. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день важным элементом энергетической политики России является эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Переход на энергосберегающие технологии, включая внедрение систем рекуперации вторичных энергоресурсов, то есть их возврата в технологическую линию, является одним из приоритетных направлений энергетической политики РФ.

Сложные схемы промышленных предприятий, таких как целлюлозно-бумажное производство, располагают ресурсами энергосбережения в виде сбрасываемых в окружающую среду потоков энергии – вторичных энергоресурсов (ВЭР) [1]. Это потоки отработанного горячего влажного воздуха сушильных установок, теплота конденсата, энергия охлаждения полупродуктов, оборотной воды.

Применение энергосберегающих технологий с использованием теплоты ВЭР требует установки специального утилизационного оборудования, которое в свою очередь требует соответствующих капитальных вложений. Выбрать наилучший вариант энергосберегающего мероприятия сложно ввиду следующих причин [1, 2]:

- масштабы существующих производств, сложность структуры производств, значительное количество сбрасываемых потоков энергии;
- данные о параметрах потоков ВЭР зачастую отсутствуют на производствах, но являются необходимыми для оценки эффективности использования сбросной теплоты;
- наличие большого количества элементов теплотехнологических схем, которые связаны прямыми и обратными связями. Это превращает систему в сложноструктурированную и замкнутую, что приводит к многочисленным итерационным согласованиям, а при отсутствии некоторых данных о параметрах ВЭР и к накоплению ошибки при проведении термодинамических расчетов.

Для перебора возможных вариантов включения теплоутилизационных установок и оценки критериев выбора энергосберегающего варианта актуальна разработка программного обеспечения, объединяющего структурный и термодинамический виды анализа. Ввиду большого количества элементов в системе с обратными связями, которые усложняют расчет схемы, автоматизированное определение оптимальной последовательности расчета элементов и определения минимального количества мест, в которых можно задаться параметрами потоков, является важной задачей [2].

В связи с этим *целью работы* является разработка алгоритма структурно-термодинамического анализа, позволяющего преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей, данные о которых зачастую отсутствуют на целлюлозно-бумажных производствах, но являются необходимыми для оценки термодинамической эффективности использования ВЭР. Выявленная оптимальная последовательность элементов значительно упростит дальнейшие действия по обеспечению организации энергоэффективной системы производства.

Научная и практическая новизна исследования. На основе предлагаемого алгоритма проведения структурно-термодинамического анализа разработан программный продукт, позволяющий автоматизированно проводить последовательный термодинамический расчет многоконтурной теплотехнологической схемы с минимумом итераций и минимизацией ошибки, что позволило определить тепловой и эксергетический потенциал потоков ВЭР, выбрать потоки для дальнейшей утилизации. Разработанный алгоритм можно использовать для решения вопроса по возврату вторичной энергии в технологическую схему с целью утилизации сбрасываемых энергетических потоков, а также для организации эффективной структуры многоконтурных теплоэнергетических систем различных промышленных производств, где может иметь место проблема сложноструктурированных схем.

Литературный обзор (Literature review)

Известен алгоритм структурного анализа теплотехнологических схем, применяемого в работах научной школы Ю.Г. Назмеева [2 - 4]:

1. построение матрицы смежности теплотехнологической схемы;
2. определение связей между элементами схемы, а также выделение внешних и внутренних связей;
3. выделение замкнутых и незамкнутых последовательностей элементов схемы;
4. определение количества контуров в теплотехнологической схеме, составляющих их элементов, выявление наличия комплексов взаимосвязанных контуров;
5. определение минимального количества потоков, условный разрыв которых позволяет оптимизировать схему и получить ациклический граф;
6. получение последовательности для термодинамических расчетов путем разрыва минимального количества потоков, определенных в предыдущем шаге алгоритма.

Структурный анализ позволяет представить сложноструктурированные теплотехнологические схемы в виде незамкнутой последовательности элементов и позволяет определить условно-линейную последовательность расчета. Для теплоэнергетических систем это является возможностью выявления наилучшей последовательности расчета тепловых процессов схем, то есть с помощью анализа структуры упрощается следующий этап – последовательный расчет теплоэнергетической системы с целью анализа термодинамической эффективности энергопотребления существующей технологии [5, 6].

Структурный анализ до использования его в теплотехнологических схемах находил применение при проведении анализа химико-технологических схем [7 – 10], где отмечается сложность расчета таких схем в связи с большим количеством разнотипного оборудования

и наличия в схемах большого количества обратных технологических потоков. Основоположником применения структурного подхода в рамках системного анализа для химико-технологических схем в СССР являлся Г.М. Островский, развитием идей которого в настоящее время занимаются его ученики Н.Н. Зиятдинов и Т.В. Лаптева [8, 9]. Применение структурного анализа в химической технологии позволило избежать проблемы многочисленных итераций и снизить вероятность ошибки при расчётах схем.

Применительно же к теплотехнологическим схемам предприятий со значительными резервами энергосбережения в виде вторичных энергетических ресурсов структурный анализ позволит не только определить оптимальную последовательность расчета с минимум итераций и ошибок, но и получить достоверные данные о термодинамическом потенциале потоков ВЭР, что важно при организации систем их утилизации [2, 11].

Для оценки потенциала потоков вторичных энергоресурсов применяют термодинамический анализ, позволяющий проанализировать процесс преобразования теплоты в полезную работу, рассчитать потери работоспособности тепловых потоков, выявить потоки вторичной энергии с наибольшей работоспособностью для их дальнейшей рекуперации [3, 10, 11]. Для оценки термодинамического потенциала потоков и аппаратов применяются эксергетический [12], энтропийный методы, а также метод тепловых балансов. В настоящее время термодинамический метод анализа применяется в нефтехимии [13], на энергогенерирующих предприятиях [14, 15], на объектах топливно-энергетического комплекса [16]. Проводится оценка термодинамической эффективности как всей системы, так и отдельных ее участков.

Эксергетический анализ направлен на определение степени термодинамического совершенства рабочих процессов оборудования. Он позволяет выявить потери энергии от необратимости процессов для каждого элемента и для всей системы в целом, произвести оценку эффективности элементов в составе системы, выявить эффективный способ экономии ресурсов для рассматриваемой системы [3].

Тенденция такова, что актуально соединение двух видов анализа [2, 12] – структурного анализа и термодинамического анализа в рамках так называемого системного анализа с целью минимизации ошибки в условиях неоднозначности и нехватки исходных данных о параметрах энергетических потоков, сокращения затрат времени при выборе энергоэффективного варианта системы утилизации вторичных энергоресурсов для крупнотоннажных промышленных предприятий. Разрабатываемые ранее программные продукты для структурного анализа промышленных систем решали задачи поиска контуров, разрыва циклов, нахождения последовательности расчета, однако такие продукты не включали возможность проведения одновременно термодинамических расчетов [3]. Современная задача состоит в том, чтобы в одном программном продукте была возможность автоматизировать термодинамические расчеты в соответствии с определяемой в рамках структурного анализа последовательностью [2].

Проанализированы программные продукты, которые могут быть использованы для решения вышеобозначенных задач. До данного момента методика проведения системного анализа рассматривала реализацию структурного и термодинамического анализа в разных программных продуктах. То есть при реализации структурного анализа при переводе схемы в цифровую форму вводятся только данные о взаимосвязи элементов и направлении этой связи (потока), а термодинамические параметры (давление, температура, расход, энтальпия и т.п.) к потокам не привязаны. Например, в программах Chemcad и Aspen Hysys можно частично провести термодинамический анализ. А в среде разработки LabVIEW и Matlab Simulink [7] можно построить структуру схемы и привязать параметры к потокам. Но при расчете схем с обратными связями с использованием LabVIEW сохраняется необходимость многократных итераций. Следовательно, оптимальную последовательность расчета в программных продуктах Chemcad, LabVIEW, Matlab Simulink нельзя определить [2].

Методика (Methodology)

Рассмотрим объединенную методику проведения структурного и термодинамического анализа для теплотехнологической схемы на примере целлюлозно-бумажного производства. Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) является крупнотоннажным и энергоемким объектом, где затрачивается значительное количество тепловой энергии в виде водяного пара и горячего воздуха. В структуру ЦБП входит более ста элементов, взаимосвязанных энергетическими и технологическими потоками с большим количеством обратных связей. Фрагменты теплотехнологической схемы показаны на Рис. 1 (На Рис. 1а представлен размольно-подготовительный участок, на Рис. 1б –

картоноделательный участок). Из рисунка 1 видно, что в теплотехнологической схеме ЦБП имеется значительное количество обратных связей.

Кроме того, процесс получения бумаги и картона характеризуется значительным потреблением энергии, особенно стоит отметить участок формирования бумажного полотна – бумаго- или картоноделательную машину (Рис. 1б). Норма расхода пара, согласно техническому регламенту, составляет 1,4 Гкал/т продукции, а электрической энергии – 460 кВт·ч/т. В значительном количестве тепловая энергия затрачивается при сушке бумаги или картона воздухом и сушке паром. В итоге образуется сбросная энергия в виде влажного воздуха и конденсата. Отработанный горячий воздух после картоноделательной машины (КДМ) выводится за пределы производственных помещений. Пар, поступающий в сушильные цилиндры КДМ, конденсируется, отдает свою теплоту поверхностям нагрева и частично возвращается в тепловую схему КДМ.

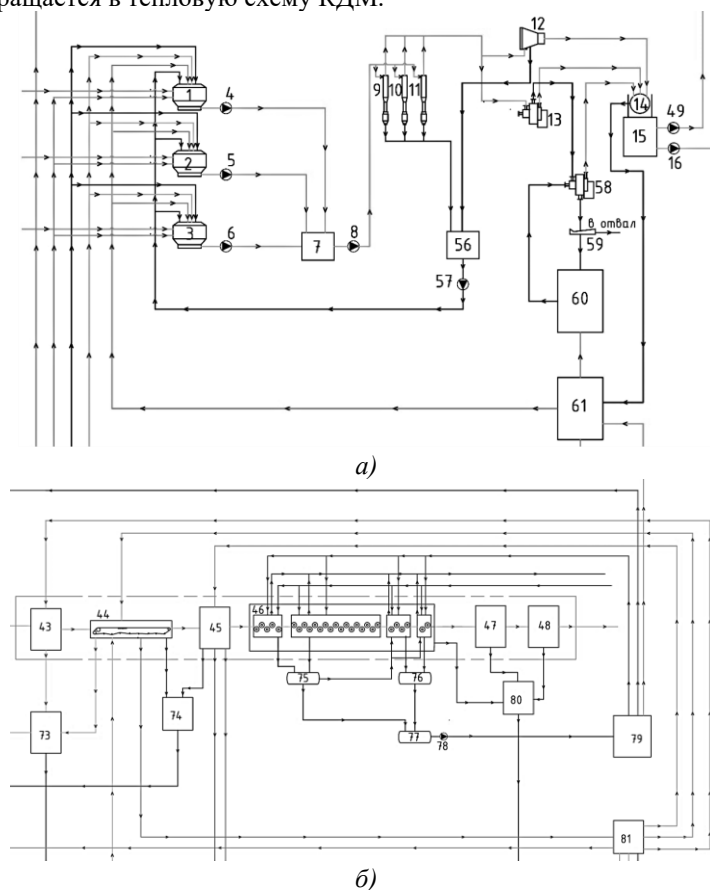


Рис.1. Теплотехнологическая схема (фрагмент) для ЦБП: а) размольно-подготовительный участок; б) – картоноделательный участок; 1-3 – гидроразбавители; 4-6, 8, 16, 49, 57 – насосы; 7, 15, 56, 61 – аккумулярующие бассейны; 9-11 – вихревые очистители; 12 – гидроразбавитель; 13, 58 – сепараторы; 14 – сгуститель; 43 – напорный ящик картоноделательной машины; 44 – сеточная часть картоноделательной машины; 45 – прессовая часть картоноделательной машины; 46 – сушильная часть картоноделательной машины; 47 – машинный каландр; 48 – продольно резательный станок; 59 – вибросортировка; 60 – бак постоянного уровня воды; 73 – бассейн подсеточной воды; 74 – бассейн мокрого брака; 75, 76, 77 – баки для конденсата; 78 – насос; 79 – станция тепловодоснабжения; 80 – бассейн сухого вещества; 81 – бассейн оборотной воды

Fig.1. Thermal technology diagram (fragment) for the CWP: a) grinding and preparatory section; b) - cardboard-making section; 1-3 – hydraulic diluents; 4-6, 8, 16, 49, 57 – pumps; 7, 15, 56, 61 – storage pools; 9-11 – vortex cleaners; 12 – hydraulic diluent; 13, 58 – separators; 14 – thickener; 43 – pressure box of the cardboard making machine; 44 – mesh part of the cardboard making machine; 45 – pressing part of the cardboard making machine; 46 – drying part of the cardboard making machine; 47 – machine calender; 48 – longitudinal cutting machine; 59 – vibrating sorting; 60 is a constant water level tank; 73 is a sub-grid water pool; 74 is a wet waste pool; 75, 76, 77 are condensate tanks; 78 is a pump; 79 is a heat supply station; 80 is a dry matter pool; 81 is a circulating water pool

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

Для реализации методики разработано программное обеспечение (ПО) для одновременного проведения и структурного, и термодинамического анализа [17]. Далее

описываются этапы проведения структурно-термодинамического анализа для теплотехнологической схемы ЦБП.

1. Для осуществления связи термодинамических параметров (давление, температура, расход) потоков теплотехнологической схемы с ее структурой схема преобразуется в ориентированный граф. Вершинами графа становятся элементы схемы, а направленными дугами – потоки схемы. Фрагмент такой структурной схемы (СС) для размольно-подготовительного участка ЦБП (рис. 1а) показан на рисунке 2.

При составлении графа используются правила:

- параллельно работающие аппараты объединяются в один элемент СС;
- в случае разделения потока или объединения потоков в один вводится дополнительный элемент для разделительного узла.

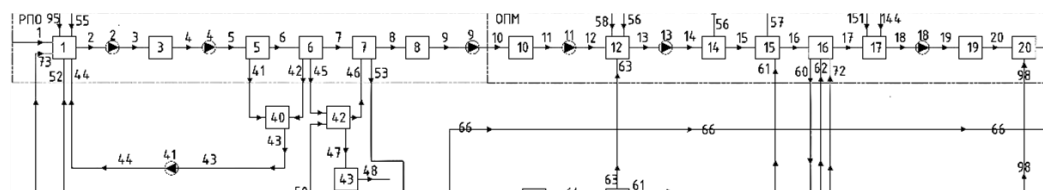


Рис. 2. Структурная схема (фрагмент) для размольно-подготовительного участка теплотехнологической схемы ЦБП: число в квадрате – номер элемента в структурной схеме; 1 – гидроразбавитель; 2, 4, 9, 41 – насосы; 3, 8, 40 – бассейны; 5 – вихревой очиститель; 6, 42 – сепаратор; 7 – стуситель; 43 – вибросортировка;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

Fig. 2. 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.

2. Граф преобразуется в цифровой вид – создается, а впоследствии загружается в разработанное ПО файл Excel, в котором представлены связи между элементами в виде матрицы смежности (фрагмент представлен на рис. 3). Далее с документа Excel берутся данные о размерности матрицы, количестве аппаратов и потоков; загружается матрица, формулы для расчетов, параметры потоков. Матрица смежности – это квадратная таблица, которая составляется следующим образом: номер строки – номер элемента, из которого выходит поток; номер столбца – номер элемента, в который направляется поток. Однако, как следует из рисунка 3, связи показаны теперь не единицами и нулями, как ранее при проведении структурного анализа отдельно от термодинамического; предложено связи обозначать порядковым номером потока. К номеру потока привязаны параметры потока (в рассматриваемом случае температура, расход и энтальпия). Далее в работе ПО для реализации матричного анализа по правилам булевой алгебры номера потоков заменяются единицами.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	2																							
2		3																						
3			4																					
4				5																				
5					6																			
6						7																		
7							8																	
8								9																
9									10															
10										11														
11											12													
12												13												
13													14											
14														15										
15															16									
16																17								
17																	18							
18																		19						
19																			20					
20																				21				
21																					22			
22																						23		
23																							24	
24																								25
25																								

Рис. 3. Цифровая форма структурной схемы – матрица смежности (фрагмент) для целлюлозно-бумажного производства

Fig. 3. Digital form of the block diagram – adjacency matrix (fragment) for pulp and paper production

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

3. Реализуется матричный алгоритм, применяемый ранее при проведении структурного анализа, а также алгоритм перебора, предлагаемый дополнительно. Матричный алгоритм заключается в перемножении матрицы саму на себя по правилам булевой алгебры [2]. Так, первое перемножение показывает наличие последовательностей

из 3-х элементов или контуров их 2-х элементов, второе перемножение – последовательности из 4-х элементов или контуров из 3-х элементов и т.п. [3, 17]. Элементы, из которых состоят контуры, располагаются на диагонали матрицы, что говорит о том, что связь замкнулась сама на себя. Далее для выявления контуров из элементов, находящихся на диагонали матрицы, предложено использовать алгоритм перебора [17]. Впервые включение метода перебора позволяет найти не только замкнутые последовательности элементов, но и разомкнутые. Что помимо решения проблемы многочисленных итераций позволяет решать проблему недостаточности/неточности данных о параметрах потоков, прежде всего потоков ВЭР.

4. Поиск контуров-циклов и оптимальной последовательности расчета. Проводится запуск ПО на выполнение структурного и последующего термодинамического анализа, скриншоты этапов работы которого были показаны ранее в [17]. Результатами работы ПО является нахождение циклов (контуров) путем поиска единиц на диагонали матрицы с использованием алгоритма перебора (Рис. 4а), нахождение условно разрываемых потоков (Рис. 4б), определение последовательности расчета схемы с минимальным количеством итераций благодаря условному разрыву потоков с наибольшей частотой (Рис. 4в). Так, для рассматриваемого размольно-подготовительного участка схемы последовательность расчета следующая: принимаем исходные данные условно-разрываемого потока номер «2»; на их основе производится расчет аппарата 2, затем рассчитываются аппарат 3; 4; 5; 6; 40; 41, 42, 43, 1, после чего происходит итерационное согласование параметров потока под номером «2»; затем расчет аппаратов 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

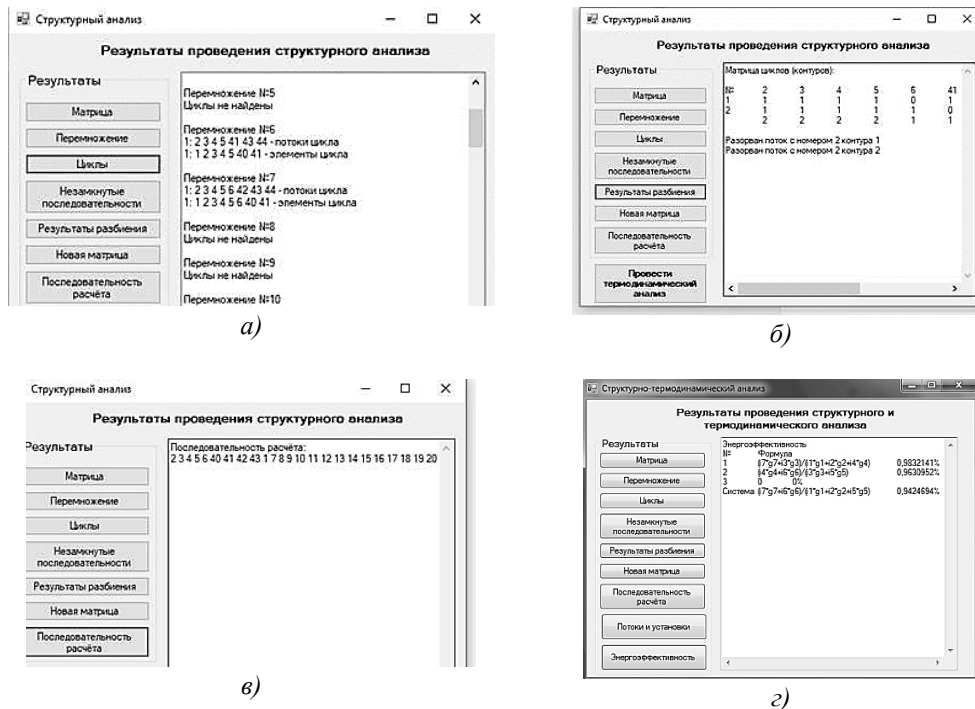


Рис. 4. Этапы работы ПО структурно-термодинамического анализа: а) выявление циклов (контуров); б) составление матрицы найденных циклов и поиск условно разрываемых потоков; д) определение последовательности расчета с минимальным количеством итераций; е) оценка энергетической эффективности оборудования

Fig. 4. Stages of work on structural and thermodynamic analysis: a) identification of cycles (contours); б) compilation of a matrix of found cycles and search for conditionally discontinuous flows; д) determination of the calculation sequence with a minimum number of iterations; е) evaluation of the energy efficiency of equipment

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

5. Блок термодинамических расчетов (Рис. 4г). При проведении термодинамических расчетов определяются значения тепловой и эксергетической мощности каждого потока схемы, определяются тепловые и эксергетические КПД аппаратов, блоков (групп аппаратов) и всей теплотехнологической схемы в целом. Среди потоков вторичных энергоресурсов выбираются потоки с наибольшей эксергетической ценностью, наибольшей работоспособностью, которые могут быть полезно использованы в той же теплотехнологической схеме. Ранее предлагалось прежде всего выбирать потоки с

наибольшим коэффициентом ценности теплоты K , который представлял собой соотношение эксергии к теплоте e/q [3, 4]. Однако этот коэффициент не учитывал потребность системы в расходе выбираемого потока. Поэтому предложено выбирать потоки с наибольшей эксергией при удовлетворяющем потребителя расходе (с минимальным превышением потребности в расходе потока); под потребителем подразумевается технологический процесс в той же теплотехнологической схеме – источнике ВЭР.

При расчете термодинамической эффективности всей системы для оценки эффективности системы рекуперации ВЭР следует внести следующие изменения в тепловой и эксергетический коэффициенты системного использования (КСИ) [4].

Известен эксергетический КПД_Е [3]:

$$\text{КПД}_E = \Sigma E'' - \Sigma E' = (\Sigma E' - \Sigma D) / \Sigma E' \quad (1)$$

где $\Sigma E''$ – отведенная от объекта/системы эксергетическая мощность, кВт; $\Sigma E'$ – подведенная к объекту/системе эксергетическая мощность, кВт; ΣD – эксергетические потери в объекте/системе.

Тепловой КСИ_Q для аппарата или всей системы определяет долю использования в аппарате или в системе подведенной тепловой мощности:

$$\text{КСИ}_Q = \Sigma Q'' / \Sigma Q' = (\Sigma Q' - \Sigma Q_{\text{СБР}}) / \Sigma Q', \quad (2)$$

где $\Sigma Q''$ – отведенная из объекта тепловая мощность, кВт; $\Sigma Q'$ – подведенная к объекту тепловая мощность, кВт; $\Sigma Q_{\text{СБР}}$ – тепловая мощность, кВт, отводимых из объекта или системы сбросных потоков (для целлюлозно-бумажного производства это потоки горячего воздуха, конденсата, оборотной воды, теплота охлаждения полупродуктов).

Аналогично рассчитывается эксергетический КСИ_Е.

КСИ теплотехнологической схемы примет максимально возможное значение только тогда, когда вся отводимая от объекта мощность будет использоваться в системе. То есть КСИ не приблизится к КПД, если остался хотя бы 1 неиспользованный в производстве поток ВЭР. Предлагается при расчёте КСИ не вычитать из числителя мощность потоков ВЭР, невозможных к использованию в данном производстве, что позволит приблизить значение КСИ к значению КПД при использовании всех возможных ВЭР и сделать выбор в пользу эффективного варианта рекуперации ВЭР.

Следовательно, формула (2) примет вид:

$$\text{КСИ}_Q = (\Sigma Q'' - \Sigma Q_{\text{СБР}}) / \Sigma Q' = ((Q_{\text{ВЭР}}' + Q_{\text{ВЭР}}'' + Q_{\text{ПРОД}}) - \Sigma Q_{\text{СБР}}) / \Sigma Q', \quad (3)$$

где $Q_{\text{ВЭР}}'$ и $Q_{\text{ВЭР}}''$ – соответственно тепловая мощность потоков ВЭР, которые нашли применение в производстве и тепловая мощность потоков, которые в данном производстве использовать невозможно из-за отсутствия соответствующего потребителя, кВт; $Q_{\text{ПРОД}}$ – тепловая мощность потока производимого продукта, кВт.

Результаты расчетов (Calculation results)

По изложенному алгоритму был проведен структурный и термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства, состоящей из 166-ти элементов тепломассообменного и разделительного оборудования, такого как картоноделательная машина, сушильные установки, теплообменные аппараты, ректификационные колонны, реакторы, сепараторы, циклоны, а также нагнетательное, транспортирующее и емкостное оборудование. Потоки, связывающие эти элементы, превращают технологическую цепочку в многоконтурную схему.

Для полной схемы производства бумаги выявлено несколько сотен контуров и минимальное количество условно разрываемых потоков – 20. Это потоки с номерами: 24 (разрывает большинство циклов), 233, 238, 229, 220, 214, 199, 128, 166, 178, 2, 13, 50, 60, 68, 30, 31, 80, 81, 113. Они показаны жирными линиями на СС на рисунках 5-7. Это потоки, условный разрыв которых позволит рассчитать всю схему с минимумом итераций.

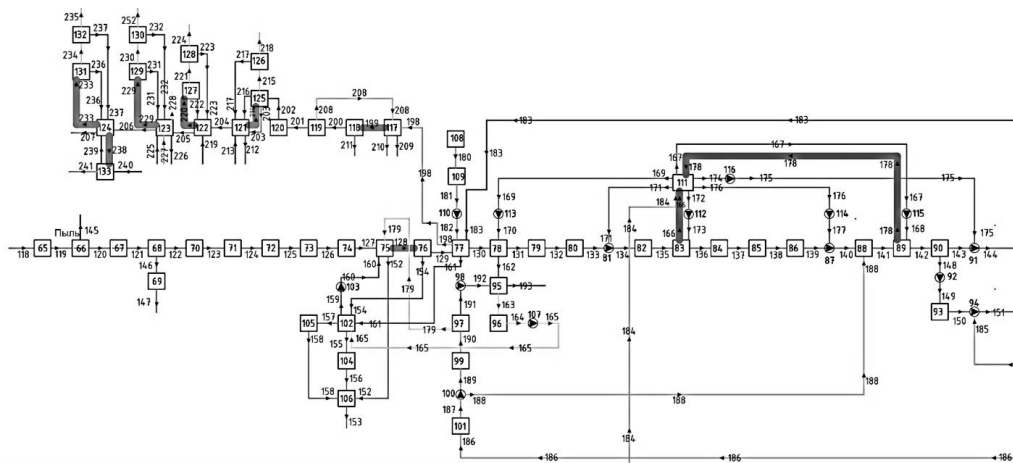


Рис.5. Структурная схема целлюлозно-бумажного производства с условно-разрываемыми потоками
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

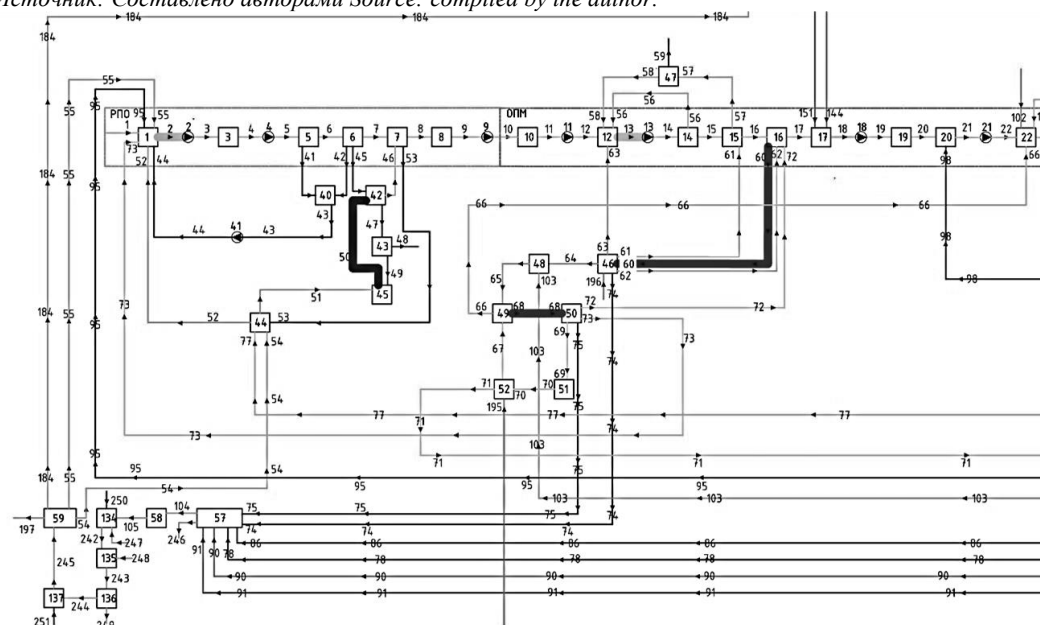


Рис.6. Структурная схема целлюлозно-бумажного производства с условно-разрываемыми потоками (продолжение)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

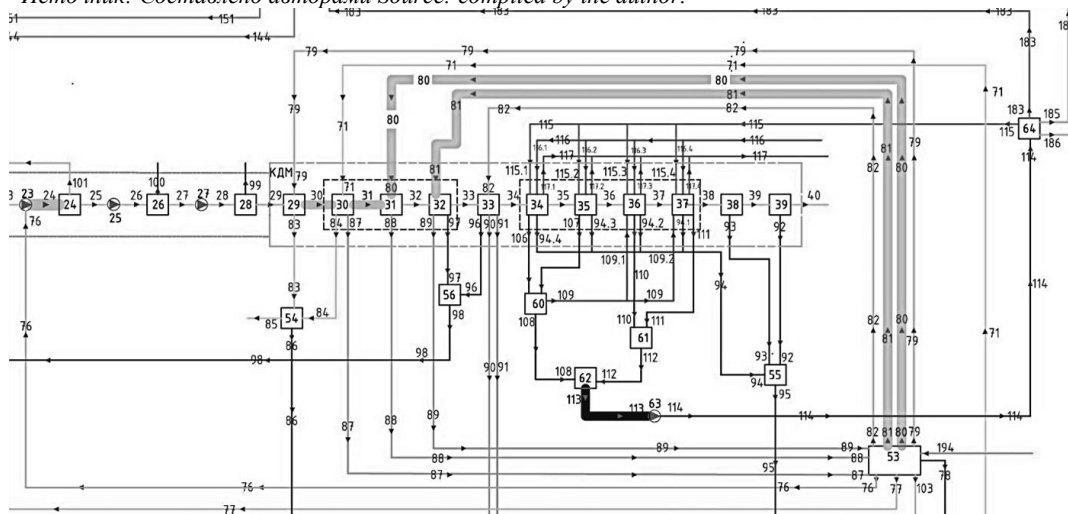


Рис.7. Структурная схема целлюлозно-бумажного производства с условно-разрываемыми потоками (продолжение)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По итогам проведения структурного анализа вся структурная схема целлюлозно-бумажного производства разделена на блоки по слабым связям, то есть по связям/потокам, которые не входят в состав контуров; выделено 12 блоков – групп аппаратов. На этом иерархическом уровне проведен термодинамический анализ, составлены тепловые и эксергетические балансы каждого элемента блока, всего блока и всей теплотехнологической схемы в целом (часть схемы, а именно сушильная часть бумагоделательной машины, представлена на рисунке 1).

В таблице 1 показаны результаты расчета блока картоноделательной машины, структурная схема которого представлена на рисунке 8.

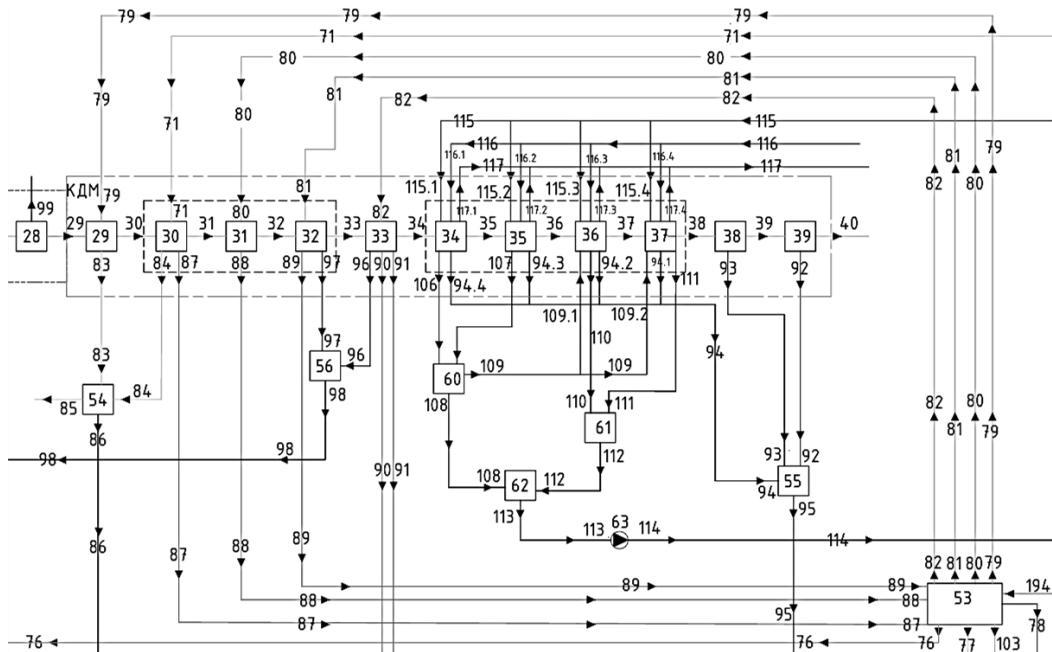


Рис. 8. Структурная схема блока бумагоделательной машины: 28 – узлоловители; 29 – напорный ящик; 30 – участок обезвоживания; 31 – отсасывающие ящики; 32 – гауч-вал; 33 – прессовая часть картоноделательной машины; 34 – 1-я группа цилиндров сушильной части картоноделательной машины; 35 – 2-я группа цилиндров; 36 – 3-я группа цилиндров; 37 – 4-я группа цилиндров; 38 – машинный каландр; 39 – резательный станок; 53 – бассейн оборотной воды; 54 – бассейн подсеточной воды; 55 – бассейн сухого брака; 56 – бассейн мокрого брака; 60 – 62 – баки для конденсата; 63 – насос

Fig.8. Structural diagram of the paper machine unit: 28 – nodules; 29 – pressure box; 30 – dewatering area; 31 – suction boxes; 32 – nut shaft; 33 – pressing part of the cardboard machine; 34 – 1st group of cylinders of the drying part of the cardboard machine; 35 – 2nd group cylinders; 36 – 3rd group of cylinders; 37 – 4th group of cylinders; 38 – a machine calender; 39 – a cutting machine; 53 – a pool of recycled water; 54 – a pool of sub-grid water; 55 – a pool of dry waste; 56 – a pool of wet waste; 60 – 62 - condensate tanks; 63 – pump

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

Результаты расчета для элементов, входящих в блок картоноделательной машины с указанием значений эксергетической мощности в элементах схемы, потерь эксергетической мощности, эксергетических КПД представлены в Таблице 1. Взяты только те элементы, в которых происходит изменение температуры, давления, расхода, состава потоков.

Таблица 1
Table 1

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок картоноделательной машины
The results of the exergetic calculation of the elements included in the block of the cardboard machine

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Эксергия потока, кВт	Изменение эксергии потока в элементе, кВт	Потери эксергии в элементе, кВт	Эксергетический КПД, %
Напорный ящик КДМ 29				
29, 79	6132,71	149,51	149,51	97,56

Продолжение таблицы 1

30, 83		5983,2				
Участок предварительного обезвоживания 30						
30, 71		5073,28		217,95	217,95	95,7
31, 84, 87		4855,32				
Удаление воды в гауч-вале 32						
32, 81		438,29		54,57	54,57	87,54
33, 89, 97		383,72				
Обезвоживание и уплотнение в прессовой части КДМ 33						
33, 82		556,0		229,96	229,96	58,64
34, 90, 91, 96		326,04				
Сушка в 1 группе цилиндров сушильной части 34						
115.1, 116.1	106, 117	2106,06	813,39	1292,67	492,53	61,89
34	35, 94.4	105,21	905,39	800,14		
Сушка в 2 группе цилиндров сушильной части 35						
115.2, 116.2	107, 117.2	2106,06	813,39	1292,67	396,15	69,35
35	36, 94.3	216,18	1112,67	896,52		
Сушка в 3 группе цилиндров сушильной части 36						
115.3, 116.3, 109.1	110, 117.3	2282,5	1123,81	1158,69	469,47	59,48
36	37, 94.2	423,45	1112,67	689,21		
Сушка в 4 группе цилиндров сушильной части 37						
115.4, 116.4, 109.2	111, 117.4	2282,5	1675,12	607,38	322,56	46,89
37	38, 94.1	423,45	708,27	284,81		

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

Как следует из таблицы 1, значительные эксергетические потери присутствуют в сушильных частях картоноделательной машины, что объясняется потерями тепловой мощности в связи с выходом количества воздуха, не находящего применения в схеме. Видно, что у аппаратов 34 – 37 эксергетический КПД значительно ниже. Поэтому следует производить модернизацию именно этих аппаратов, а именно осуществить в данные аппараты возврат энергии потоков наибольшего эксергетического потенциала.

Максимально достижимый эксергетический КСИ данного блока (при расчете эксергии теплового потока), %:

$$КСИ_E = (E_{38} + E_{94} + E_{117} + E_{106} + E_{107} + E_{110} + E_{111}) \cdot 100 / (E_{34} + E_{115} + E_{116} + E_{109}) = 2225,68 \cdot 100 / 3843,21 = 57,91 \quad (4)$$

При этом действительный КСИ данного блока ниже в связи с выбросом потока горячего воздуха в окружающую среду, %:

$$КСИ_E = (E_{38} + E_{94} + E_{106} + E_{107} + E_{110} + E_{111}) \cdot 100 / (E_{34} + E_{115} + E_{116} + E_{109}) = 605,35 \cdot 100 / 3843,21 = 15,75 \quad (5)$$

Рассчитаны тепловые и эксергетические КПД всех аппаратов, блоков и всей схемы в целом. Тепловая и эксергетическая мощность всех входных и выходных потоков, а также КПД и КСИ исходной системы без утилизации ВЭР представлены в таблице 2. Как следует из Таблицы 2, а именно из низкого значения КСИ, в схеме имеется значительное количество выходных потоков с высоким потенциалом энергосбережения, но при этом сбрасываемых в окружающую среду. Так, например, тепловой КСИ можно поднять с 17,88 % до уровня КПД 81,02 % возвратом в производство всех сбрасываемых ВЭР.

С целью оценки потенциала повышения КСИ до уровня КПД проведена оценка термодинамического потенциала вторичных энергоресурсов исследуемой схемы. Для этого рассмотрены выходные потоки со значительной эксергетической мощностью в системе, то есть проведен поиск вторичных энергоресурсов и оценка потребности в энергоресурсах (табл. 3).

Таблица 2
Table 2

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок
картоноделательной машины
*The results of the exergetic calculation of the elements included in the block of the
cardboard machine*

№ потока	Тепловая мощность подведенных к системе потоков $Q_1, \text{кВт}$	Эксергетическая мощность (тепловая компонента) подведенных потоков $E_{Q1}, \text{кВт}$	№ потока	Тепловая мощность отведенных от системы потоков $Q_2, \text{кВт}$	Эксергетическая мощность (тепловая компонента) отведенных потоков $E_{Q2}, \text{кВт}$
1	24,97	0,49	40	200,93	42,97
102	18,20	0,35	48	2,96	0,20
116	2866,26	733,85	59	439,17	49,81
118	259,97	5,05	85	20783,68	1749,12
194	2379,38	200,25	99	1210,86	137,33
195	87,54	7,37	100	4435,40	503,06
196	23368,29	1966,64	117	8089,98	1620,33
213	1816,19	624,72	145	6,17	0,33
219	1562,85	537,57	147	41,16	2,18
225	1754,89	603,63	153	620,00	32,80
227	0,06	0,00	193	76,90	6,47
240	1694,42	795,38	197	663,47	45,64
247	9,74	0,52	207	60,38	12,67
248	32,13	1,70	209	30,76	2,77
250	1333,16	70,53	210	6,42	0,58
251	11719,78	619,99	211	42,47	3,83
			212	214,37	57,00
			218	5,15	0,92
			224	0,05	0,01
			226	244,54	65,16
			228	3,49	0,79
			235	0,12	0,02
			241	179,82	60,44
			246	269,34	14,25
			249	656,78	34,74
			252	2,23	0,40
			253	1357,14	237,95
Итого	48927,84	6168,03	Итого	39643,73	4681,77
Потери без учета ВЭР	9284,11	1486,25			
Потери с учетом ВЭР	40178,38	5139,30			
КПД без учета потерь с ВЭР	81,02	75,90			
КСИ с учетом потерь с ВЭР	17,88	16,68			

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

Результаты расчета потенциала таких потоков представлены в Таблице 3. Это потоки воздуха 117 от сушильных установок 34, 35, 36, 37; оборотной воды 85 в бассейне

подсечной воды 54, верхнего продукта колонны 253, сточных вод 197. Определен расход получаемого энергоносителя за счет потенциала ВЭР, так как при организации системы рекуперации ВЭР важен учет потребности в расходе замещающего энергоносителя в нужном количестве.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета термодинамического потенциала потоков вторичных энергетических ресурсов

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

№ потока	Тепловая мощность, отведенная $Q_{отв}$, кВт	Эксергетическая мощность, отведенная $E_{отв}$, кВт	Принимаемая в утилизационном аппарате тепловая мощность, $Q_{пол}$, кВт	Принимаемая в утилизационном аппарате эксергетическая мощность, $E_{пол}$, кВт	Расход получаемого энергоносителя $G_{эн}$, кг/с	Вид используемого потока
85	20783,68	1749,12	3454,31	557,00	25,94	оборотная вода
117	8089,98	1620,33	10695,34	2589,15	28,52	теплый воздух
197	663,47	45,64	264,77	31,11	1,99	сточные воды
253	1357,14	237,95	1357,14	237,95	6,73	продукт колонн
Итого:	30894,27	3653,04	10133,38	2285,95		

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

Анализ результатов показал, что у ряда аппаратов с высокой энергоемкостью и потерями потоков в виде теплоты охлаждения, теплоты полупродуктов, теплоты отработанного воздуха, теплоты сточных вод КПД значительно ниже. Поэтому следует осуществить в данные аппараты возврат энергии сбросных потоков наибольшего эксергетического потенциала.

Заключение (Conclusion)

Разработанный алгоритм и ПО структурно-термодинамического анализа обеспечивает проведение последовательного термодинамического расчета многоэлементной теплотехнологической схемы с минимальным количеством итераций. Данный подход позволил снизить вероятность ошибки и затраты времени на получение значений термодинамических параметров системы в условиях неоднозначности исходных данных о параметрах энергоносителей, являющихся основой для последующего выбора энергосберегающей системы рекуперации вторичной энергии.

В результате вывалены 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. Теплота полупродуктов и отработанного воздуха может найти применение в установках – источниках данной сбросной энергии, что эффективно с точки зрения минимизации потерь сбросной энергии при ее транспортировке от источника к потребителю. В связи с этим данное направление использования структурно-термодинамического анализа перспективно при расчетах многоэлементных энергоемких установок, таких как ректификационные колонны модернизированных конструкций, выпарные и сушильные установки, абсорбционные трансформаторы теплоты и т.п.

Литература

1. 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>.
2. Plotnikova L.V., Giniyatov R.R., Sitnikov S.Y., Fedorov M.A., Zaripova R.S. Perfection of the methodology for developing industrial secondary energy generation systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 288 (1). 2019. P. 012069.
3. 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.
4. Валиев Р.Н. Разработка системы комплексной утилизации вторичных энергоресурсов для тепловых схем дегидрирования изоамиленов в изопрен в производстве синтетического изопренового каучука СКИ-3: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2001. – 161 с.

5. Федюхин А.В., Звончевский А.Г. Перспективные направления использования теплоты низкопотенциальных источников химических производств. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24(3):15-27. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27>.
6. Степаненко М.Н., Мартынов А.В., Шелгинский А.Я. Анализ эффективности использования теплонасосных установок для утилизации теплоты вентиляционных выбросов. Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 4. С. 180-188.
7. Долотовский, И. В. Алгоритмы структурнопараметрической оптимизации энергетического комплекса предприятий подготовки и транспортирования углеводородов / И. В. Долотовский, А. В. Ленькова // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 11. – С. 10-15.
8. Гарипов, Н. И. Системный анализ технологического процесса реакторного узла установки производства метанола / Н. И. Гарипов, Н. Н. Зиятдинов, И. И. Емельянов // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 8. – С. 109-115. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_8_109.
9. G.M. Ostrovskii, T.V. Lapteva, N.N. Ziyatdinov, I.M. Zaitsev. Two-step problems of optimization of chemical engineering processes. Doklady Chemistry. – 2010. – Vol. 435, No. 2. – P. 343-346. – DOI 10.1134/S0012500810120086.
10. 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.
11. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 31, iss. 14–15, pp. 2529–2540. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.018>.
12. Юшкова Е.А., Лебедев В.А., Яковлев П.В., Акманова М.С. Структурная оптимизация эксергетическим пинч-анализом. Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. № 5(95) 2020. С. 37-40.
13. Рыжова А.А., Емельянов И.И. Термодинамический анализ установки ЭЛОУ АВТ в сборнике: Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. Материалы VI Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых. 2020. С. 399-404.
14. Ноздренко Г.В., Щинников П.А. Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭС с новыми технологиями: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 190 с.
15. А.В. Волков, А.С. Маленков, А.Я. Шелгинский, Н.Е. Кутько. Эксергетический анализ системы теплоснабжения с пониженной температурой обратной сетевой воды. Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 227-234. – DOI 10.24223/1999-5555-2018-11-3-227-234.
16. Долотовский И.В. Термодинамический анализ элементов энергетического комплекса газоперерабатывающих предприятий. Труды Академэнерго. 2017. № 3. – С. 7-22.
17. 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.

Авторы публикации

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

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

References

1. Lukanin P.V., Kazakov V.G., Zverev L.O. Concept of PPI energy technology complex upgrading. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(4):178-191. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.
2. Plotnikova L.V., Giniyatov R.R., Sitnikov S.Y., Fedorov M.A., Zaripova R.S. Perfection of the methodology for developing industrial secondary energy generation systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 288 (1). 2019. P. 012069.

3. Nazmeev, Yu. G. Organization of energy technology complexes in the petrochemical industry. Yu. G. Nazmeev, I. A. Konakhina. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 2001. 364 p. ISBN 5-7046-0698-9. EDN XGNUVV.
4. Valiev R.N. Development of a system for the integrated utilization of secondary energy resources for thermal schemes for the dehydrogenation of isoamylenes into isoprene in the production of synthetic isoprene rubber SKI-3: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Kazan, 2001. – 161 p.
5. Fedyukhin A.V., Zvonchevsky A.G. Promising directions for the use of heat from low-potential sources of chemical production. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(3):15-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27>.
6. Stepanenko M.N., Martynov A.V., Shelginsky A.Ya. Analysis of the efficiency of using heat pump installations for heat recovery of ventilation emissions Reliability and safety of energy. 2021. Vol. 14. No. 4. pp. 180-188.
7. Dolotovskiy, I. V. Algorithms of structural parametric optimization of the energy complex of enterprises of preparation and transportation of hydrocarbons. I. V. Dolotovskiy, A.V. Lenkova. Automation. Modern technologies. – 2016. – No. 11. – pp. 10-15.
8. Garipov, N. I. System analysis of the technological process of the reactor unit of the methanol production plant. N. I. Garipov, N. N. Ziyatdinov, I. I. Yemelyanov. Bulletin of the Technological University. – 2024. – Vol. 27, No. 8. – pp. 109-115. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_8_109.
9. G.M. Ostrovskii, T.V. Lapteva, N.N. Ziyatdinov, I.M. Zaitsev. Two-step problems of optimization of chemical engineering processes. Doklady Chemistry. – 2010. – Vol. 435, No. 2. – pp. 343-346. – DOI 10.1134/S0012500810120086.
10. 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. – pp. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.
11. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 31, iss. 14–15, pp. 2529–2540. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.018>.
12. Yushkova E.A., Lebedev V.A., Yakovlev P.V., Akmanova M.S. Structural optimization by exergetic pinch analysis // Energy conservation and energy efficiency. No. 5(95) 2020. pp. 37-40.
13. Ryzhova A.A., Emelyanov I.I. Thermodynamic analysis of elou avt installation in the collection: applied mathematics and informatics: modern research in science and technical sciences. Materials of VI International Scientific and Practical Conference (school-seminar) of young scientists. 2020. pp. 399-404.
14. Nozdrenko G.V., Shinnikov P.A. Complex exergy analysis of TPP power units with new technologies: monograph. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2009. – 190 p.
15. A.V. Volkov, A.S. Malenkov, A.Y. Shelginsky, N.E. Kutko. Exergetic Analysis of Heat Supply System with Reduced Return Network Water Temperature. Reliability and safety of power engineering. - 2018. – Vol. 11, № 3. – pp. 227-234. - DOI 10.24223/1999-5555-2018-11-3-227-234.
16. Dolotovskiy I.V. Thermodynamic analysis of elements of energy complex of gas processing enterprises. Trudy Akademenergo. 2017. № 3. pp. 7-22.
17. Plotnikova LV, Torkunova YuV. Software for system analysis of complexly structured industrial complexes in the development energy saving measures. Kazan state power engineering university bulletin. 2022. Vol. 14. № 1(53). pp. 140-154.

Authors of publication

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

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

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено

28.05.2025 г.

Отредактировано

01.06.2025 г.

Принято

14.06.2025 г.