

Плотникова Л. В.

Калинина М. В.

Ваньков Ю. В.

**Системный подход  
к повышению эффективности  
энергетического комплекса  
целлюлозно-бумажного  
производства**



Монография

Л. В. Плотникова, М. В. Калинина, Ю. В. Ваньков

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Монография

Электронное издание  
локального распространения

Санкт-Петербург  
Научные технологии  
2025

© Плотникова Л. В., Калинина М. В.,  
Ваньков Ю. В., 2025  
© Казанский государственный  
энергетический университет, 2025  
ISBN 978-5-907946-26-2

УДК 620.9:658.264

ББК 31.3

ПЗ9

Рецензенты:

*Андрей Николаевич Николаев* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудования пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета;

*Ирина Гареевна Ахметова* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета

ПЗ9 **Плотникова Л. В.**

Системный подход к повышению эффективности энергетического комплекса целлюлозно-бумажного производства [Электронный ресурс]: монография / Л. В. Плотникова, М. В. Калинина, Ю. В. Ваньков. – Электрон, текстовые дан. (6,1 Мб). – СПб.: Научно-технологические технологии, 2025. – 201 с. – 1 электрон., опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-5-907946-26-2

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности промышленных предприятий целлюлозно-бумажной отрасли промышленности с использованием системного подхода. Проводится оценка термодинамической эффективности энерготехнологического комплекса в рамках анализа структуры производства. Особое внимание уделено вопросу применения трансформаторов теплоты как энергосберегающего оборудования, повышающего потенциал теплового потока.

Издание предназначено для энергетиков и технологов, занимающихся проектированием и эксплуатацией теплоэнергетических систем промышленных предприятий.

Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-226.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Казанского государственного энергетического университета.

Текстовое электронное издание

Минимальные системные требования:

- процессор: Intel x86, x64, AMD x86, x64 не менее 1 ГГц;
- оперативная память RAM ОЗУ: не менее 512 МБайт;
- свободное место на жестком диске (HDD): не менее 120 МБайт;
- операционная система: Windows XP и выше;
- Adobe Acrobat Reader;
- дисковод CD-ROM;
- мышь.

© Плотникова Л. В., Калинина М. В.,  
Ваньков Ю. В., 2025

© Казанский государственный  
энергетический университет, 2025

ISBN 978-5-907946-26-2

Научное издание

**Плотникова Людмила Валерьяновна**  
**Калинина Марина Владимировна**  
**Ваньков Юрий Витальевич**

Системный подход к повышению эффективности энергетического комплекса  
целлюлозно-бумажного производства

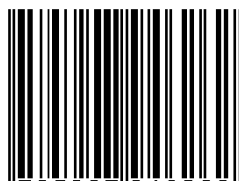
Монография

Электронное издание  
локального распространения

Издательство «Наукоемкие технологии»  
ООО «Корпорация «Интел Групп»  
<https://publishing.intelgr.com>  
E-mail: [publishing@intelgr.com](mailto:publishing@intelgr.com)  
Тел.: +7 (812) 945-50-63  
Интернет-магазин издательства  
<https://shop.intelgr.com/>

Подписано к использованию 16.01.2025 г.  
Объем издания – 6,1 Мб.  
Комплектация издания – 1 CD.  
Тираж 100 CD.

ISBN 978-5-907946-26-2



9 785907 946262 >

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
РАЗДЕЛ 1 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРЕДПРИЯТИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	8
1.1 Энергетический баланс целлюлозно-бумажного производства .....	8
1.2 Энергосберегающее оборудование для целлюлозно-бумажных производств.....	12
1.3 Теплотехнологическая схема производства бумаги и картона .....	24
РАЗДЕЛ 2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ.....	46
2.1. Производство как сложная система .....	46
2.2 Иерархия теплopotребляющих установок.....	53
2.3 Общие положения системного подхода .....	55
2.4 Методика проведения анализа структуры теплотехнологических схем с обратными связями .....	70
3 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	94
3.1 Информационная система производства бумаги и картона .....	94
3.2 Программное обеспечение системного анализа для проведения термодинамических расчетов сложноструктурированных промышленных комплексов .....	101
3.3 Результаты структурного анализа теплотехнологической схемы производства бумаги и картона .....	113
РАЗДЕЛ 4 ЭТАП ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ .....	123
4.1 Критерии оценки термодинамической эффективности систем .....	123
4.2. Оценка термодинамического потенциала материальных и тепловых потоков теплотехнологической схемы производства бумаги и картона.....	127
4.3 Построение тепловых и эксергетических балансов блоков теплотехнологической схемы производства бумаги и картона .....	138
4.4 Расчет сушильной установки картоноделательной машины .....	162
4.5 Результаты анализа термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги и картона .....	166

РАЗДЕЛ 5 ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ И КАРТОНА .....	170
5.1 Оценка термодинамического потенциала вторичных энергетических ресурсов теплотехнологической схемы производства бумаги и картона .....	170
5.2 Расчет теплонасосной установки для рекуперации тепла отработанного влажного воздуха при производстве бумаги и картона .....	177
5.3 Оценка термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги с включением системы рекуперации теплоты отработанного воздуха сушильных установок .....	184
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	194

## ВВЕДЕНИЕ

Крупнотоннажные промышленные предприятия со сложной структурой, к которым относятся предприятия целлюлозно-бумажной отрасли, обладают значительными резервами энергосбережения в виде возможных к использованию потоков сбросной энергии: теплоты конденсата, отработанного пара, пара вторичного вскипания, оборотной и технической воды, теплоты отработанного потока воздуха, теплоты технологических полупродуктов и т.п.

Однако имеется сложность структуры таких предприятий, которая определяется большим количеством элементов в составе теплотехнологической схемы производства, обратными потоками, связями с окружающей средой в виде потребляемых топливно-энергетических ресурсов и сбросной энергии, что затрудняет получение достоверной информации о параметрах энергетических потоков технологических линий, следовательно, затрудняет принятие решений о способе возврата сбросной энергии в технологию.

Для таких предприятий вариантов создания энерготехнологических комплексов с включением энергосберегающего и оборудования может быть множество. Часто на производстве критерием выбора энергосберегающего мероприятия является срок окупаемости. Однако несколько мероприятий с близким сроком окупаемости могут иметь различный энергетический эффект. Поэтому для выбора эффективного варианта предложено использование системного подхода к анализу теплотехнологических схем.

Применение структурного анализа позволяет, помимо определения последовательности расчета с минимальным количеством итераций/допущений, также преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей, данные о которых зачастую отсутствуют на производствах, но являются необходимыми для оценки эффективности использования сбросной теплоты.

Проведение структурного анализа предложено дополнить эксергетическим анализом в рамках единого программного продукта, что поможет в выборе наиболее эффективного варианта энергосберегающего мероприятия.

В 1 разделе дается представление о энергопотреблении, потерях тепловой энергии и о вторичных энергетических ресурсах целлюлозно-бумажной отрасли промышленности. Показано приоритетное оборудование для рекуперации вторичной энергии в энерготехнологических комплексах целлюлозно-бумажных производств.

2-й раздел посвящен обзору методов системного анализа для промышленных схем.

3-й раздел знакомит со структурой целлюлозно-бумажного производства. В нем также представлены результаты проведения структурного анализа с использованием разработанного программного обеспечения, объединяющего структурный анализ и анализ термодинамической эффективности сложных многоконтурных систем.

4-й раздел посвящен термодинамическому анализу. Здесь представлены результаты анализа термодинамической эффективности для теплотехнологической схемы производства бумаги и картона. В разделе делается акцент на критериях эффективности как элементов оборудования, так и всей системы.

В 5 разделе произведена оценка эксергетического потенциала вторичных энергоресурсов, проведены расчеты вариантов включения теплонасосных установок в теплотехнологическую схему производства бумаги и картона, с использованием термодинамических показателей обоснован наиболее эффективный вариант энергокомплекса с рекуперацией сбросной энергии.



# **РАЗДЕЛ 1 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРЕДПРИЯТИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

## **1.1 Энергетический баланс целлюлозно-бумажного производства**

Целлюлозно-бумажная отрасль промышленности является наиболее энерго-, материалоемкой и капиталоемкой подотраслью лесопромышленного комплекса. Для оборудования целлюлозно-бумажной промышленности характерны высокая стоимость, трудоемкость его проектирования, монтажа и наладки, долгие сроки окупаемости вложенных средств и необходимость долгосрочного планирования экономических результатов от его запуска и модернизации.

В зависимости от сорта выпускаемой продукции и принятой технологии удельные расходы энергоресурсов в целом по целлюлозно-бумажным комбинатам изменяются в довольно широких пределах. Именно поэтому научные исследования в области определения источников и количества теряемых энергетических ресурсов, разработки рациональных методов их использования и конструкций оборудования целлюлозно-бумажных комбинатов требует необходимого изучения.

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности – крупные потребители тепловой и электрической энергии. Из общего количества топлива, потребляемого всеми целлюлозно-бумажными комбинатами, 74 % расходуется на выработку тепла, 20 % – электроэнергию (все крупные целлюлозно-бумажные комбинаты имеют собственные ТЭЦ), 4 % – на технологические нужды и 2% – на прочие нужды. Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности в зависимости от их производительности в своем составе имеют энергетические котельные, котельные для сжигания коры, энергетические теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), энерготехнологические ТЭЦ.

Для предприятия целлюлозно-бумажной промышленности с годовой производительностью 165 тысяч тонн бумаги и 140 тысяч тонн целлюлозы энергопотребление составляет: на участке варки целлюлозы до 1,46 МВт, для производства бумаги – 2,5 МВт, для производства спирта 0,84 МВт (рис. 1.1).

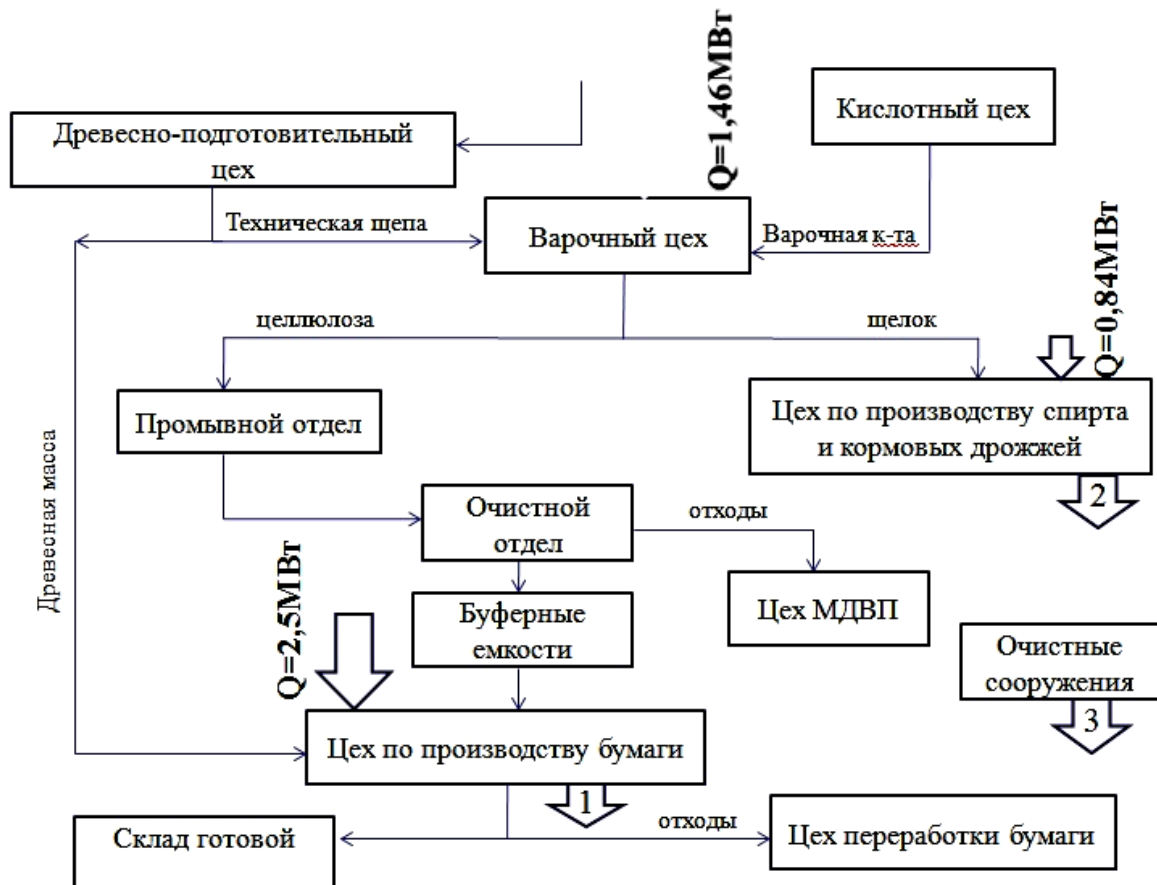


Рис. 1.1 Технология целлюлозно-бумажного производства:

- 1 – отработанный нагретый влажный воздух картоноделательной машины;
- 2 – теплая вода при конденсации водно-спиртовых паров метанольной и спиртовой колонн; 3 – сточные воды; МДВП – мягкие древесноволокнистые плиты

Структура теплопотребления характеризуется преобладающим расходом тепла на технологические нужды. Из общего количества теплоты около 80% идет на основные технологические процессы, около 15 % – на технологические нужды вспомогательных цехов и 5 % – на прочие нужды. Наиболее теплоемкие процессы – варка целлюлозы, выпаривание щелока, отбелка, облагораживание,

сушка целлюлозы, бумаги и картона. На производство целлюлозы расходуется 37 % тепла, бумаги – 20 %, картона – 10 %.

Целлюлозно-бумажные комбинаты являются крупными потребителями электроэнергии. На производство бумаги используется 24 % потребляемой электроэнергии, картона – 9 %, целлюлозы – 17 %, древесной массы – 16 %. Основная доля электроэнергии (около 85 %) расходуется на электропривод технологических и вспомогательных механизмов [1].

Самым энергозатратным участком цеха по производству полуфабрикатов является участок варки полуцеллюлозы. Норма расхода пара составляет 0,9 Гкал/т, а электрической энергии – 500 кВт·ч/т.

Процесс получения бумаги и картона характеризуется очень высоким потреблением энергии в форме тепла и электричества, особенно стоит отметить участок формирования бумажного полотна – бумаго- или картонноделательную машину (КДМ). Норма расхода пара составляет 1,4 Гкал/т, а электрической энергии – 460 кВт·ч/т.

На предприятии целлюлозно-бумажного производства имеется значительное количество вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), представленных в виде:

- теплоты парогазовой смеси, выбрасываемой из котельных агрегатов,
- теплоты технологической сбросной воды, конденсата варочного и выпарного цехов,
- теплоты паровоздушной смеси, удаляемую из сушильной части бумаго- и картоноделательных машин и систем общеобменной вентиляции,
- теплоты паровоздушной смеси дефибреров,
- теплоты нагретой извести после известеобжигательной печи,
- теплоты воды при конденсации водно-спиртовых паров метанольной и спиртовой колонн,
- теплоты конденсата от технологических установок производства.

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности имеют некоторый опыт использования тепловых ВЭР, однако практика эксплуатации

теплоулавливающих установок показывает, что эффективность их использования мала. Учитывая всю сложность вопросов, возникающих при использовании ВЭР в системе целлюлозно-бумажного производства, возникает необходимость исследовать полезное применение тепловых отходов в комплексе энергосбережения [2 – 5].

Существенным источником тепловой и электрической энергии в энергетике ЦБП являются щелока, образующиеся при варке древесины. Их можно использовать для сжигания в топках котельных агрегатов. Образующаяся при этом теплота продуктов сгорания может служить для получения пара.

Биологический ил, образующийся в результате очистки сточных вод, представляет собой высоковлажное, низкокалорийное топливо, которое в настоящее время на предприятиях не сжигается, а отвозится в отвалы, загрязняя водные бассейны, занимая земельные площади.

Как следует из технологии, 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. Пар, поступающий в сушильные цилиндры картонноделательной машины (КДМ), конденсируется, отдает свою теплоту поверхностям нагрева и частично возвращается в тепловую схему КДМ. Отработанный горячий воздух после картонноделательной машины, составляющий наибольшую долю тепловых потерь производства, выводится за пределы производственных помещений. С верхним продуктом метанольных и спиртовых колонн отводится значительное количество тепловой энергии, что также является объектом для исследования с целью снижения энергоемкости ЦБК. Кроме того, целлюлозно-бумажная промышленность относится к крупным водопотребителям, следовательно, большое количество тепловой энергии сбрасывается с отработанной (оборотной, сточной) водой, которая может быть полезно использована для хозяйственных нужд внутри производства.

## **1.2 Энергосберегающее оборудование для целлюлозно-бумажных производств**

Повышение энергоэффективности является приоритетной задачей современных промышленных предприятий в том числе и целлюлозно-бумажной промышленности, в связи с высокой стоимостью натуральных видов топлива. Анализ показывает, что возможное улучшение работы промышленных предприятий целлюлозно-бумажной промышленности может быть достигнуто переходом на более высокий энерго- и ресурсосберегающий технологический уровень, который может быть получен следующими направлениями энергосбережения.

Пути решения проблем, стоящих перед целлюлозно-бумажной промышленностью – основные направления энергосбережения:

1. переход на энергосберегающие технологии и конструктивное совершенствование процессов и технологических агрегатов производства, замена энергоемких процессов менее энергоемкими, применение энергосберегающих технологий; замена устаревшего оборудования новым, более экономичным; совершенствование структуры энергопотребления производства за счет выбора наиболее эффективных энергоносителей и рационализации энергетических потоков;

2. повышение тепловых и термодинамических КПД энергетических установок и энергопотребляющих элементов, агрегатов;

3. построение энерготехнологического комплекса для теплотехнологической схемы производства на целлюлозно-бумажном комбинате и его оптимизация с привлечением методов математического моделирования, когда энергетический потенциал продуктов одного технического процесса или потока используется непосредственно без преобразования в другом процессе. Создание энерготехнологических комплексов позволяет решать проблемы реального производства в динамике преобразования его структуры, например, при изменении конструктивного

исполнения установленного оборудования, номенклатуры выпускаемой продукции в соответствии с требованиями рынка [6 – 7].

При значительной энергоемкости целлюлозно-бумажных комплексов (ЦБК) нужно отметить недостаточно эффективное использование образующихся на предприятии ВЭР [8-11]. Несмотря на то, что в технологических процессах целлюлозно-бумажной промышленности используется в основном тепловая энергия, в отрасли в основном утилизируются только горючие ВЭР, которые представляют собой отходы перерабатываемого органического сырья. Горючие ВЭР образуются в виде коры и древесных отходов, сульфитных и сульфатных щелоков. При варке целлюлозы из древесины ее органические вещества переходят в варочную кислоту. В зависимости от варочного основания образуется сульфитный и сульфатный щелок. При варке сульфатной целлюлозы образующийся черный щелок упаривают и сжигают в специальных содорегенерационных котлах с регенерацией химикатов и выработкой пара. Сульфитные щелоки используют для получения спирта, дрожжей и бардяных концентратов [1].

Проведенный анализ исследуемого производства показал [11 – 13], что значительной эксергетической мощностью характеризуются потоки уходящего воздуха бумагоделательной машины, теплая вода при охлаждении щелока и теплая вода при конденсации водно-спиртовых паров метанольной и спиртовой колонн на стадии производстве спирта. Все эти потоки являются низкотемпературными.

У аппаратов, в которых не происходит тепломассообмена, КПД высок, следовательно, нет необходимости производить их модернизацию [4]. А у таких аппаратов как прессовая и сушильная часть бумагоделательной машины, к.п.д. значительно ниже [2]. Поэтому следует производить модернизацию именно этих аппаратов, а именно осуществить в данные аппараты возврат энергии потоков наибольшего эксергетического потенциала [2, 13 – 15]. Так, например, теплоту потока отработанного влажного воздуха возможно использовать для доведения параметров отработанного влажного воздуха до

требуемых параметров греющего сухого воздуха [11]. Однако температурный уровень отработанного воздуха недостаточен для удовлетворения полной тепловой нагрузки бумагоделательной машины целлюлозно-бумажного производства. Поэтому следует искать способы поднятия потенциала греющего потока ВЭР.

Применение трансформаторов теплоты в системах рекуперации вторичной энергии позволяет существенно повысить технико-экономические показатели крупнотоннажных промышленных предприятий. Наиболее перспективными элементами для рекуперации в связи с возможностью поднятия потенциала низкопотенциальных потоков, каковыми и являются потоки ВЭР ЦБК, в настоящее время можно назвать такие трансформаторы теплоты как теплонасосные установки (ТНУ) [6, 7, 16, 17].

В работах [18 – 29] предлагаются разнообразные примеры использования низкопотенциальной теплоты для нужд технологии, отопления, горячего водоснабжения и вентиляции промышленных предприятий. Перспективным мероприятием в области экономии топливных ресурсов и утилизации низкопотенциальной теплоты является применение теплонасосных установок, в результате которого можно получить дополнительное количество теплоты.

Рекуперация вторичных энергетических ресурсов – это процесс использования энергетического потенциала продуктов одного технологического процесса или потока в другом процессе (например, энтальпия отработанного горячего влажного воздуха после бумагоделательной машины используется в качестве греющего теплоносителя исходного холодного сухого воздуха, поступающего в бумагоделательную машину) в рекуперационном аппарате [7].

В целом известные способы рекуперации теплоты ВЭР можно разделить на следующие группы [7]:

– применение теплоиспользующих установок для подогрева воды, воздуха, технологических потоков (например, различные теплообменники, контактные

экономайзеры, теплообменные аппараты на тепловых трубах, водогрейные котлы-утилизаторы, воздухоподогреватели, тепловые насосы и т.п.);

– получение пара (например, паровые котлы-утилизаторы, парогенераторы, системы сбора и возврата конденсата с получением пара вторичного вскипания) с дальнейшим использованием пара на технологию, для подогрева технологических потоков (сырья, топлива), для выработки электроэнергии;

– получение холода в абсорбционных трансформаторах теплоты (АТТ) (на нужды самого производства, например, для охлаждения циркуляционной воды системы охлаждения технологических потоков, для замены антифриза).

Трансформаторы теплоты же стоят отдельной группой, так как предназначены для повышения энергетического потенциала низкопотенциального потока [16]. В основном это потоки оборотной или технической воды, потоки пара вторичного вскипания и теплота охлаждения полупродуктов.

В вариантах промышленного применения ТНУ:

– позволяет отапливать промышленные помещения, цеха, склады и административные здания, снижая эксплуатационные затраты на содержание зданий по сравнению с дизельными котельными – в 8 – 10 раз, по сравнению с электрическим отоплением – в 4 – 6 раз, по сравнению с муниципальными теплосетями – в 2 – 3 раза;

– при устройстве промышленной вентиляции за счёт комплексного использования с воздушным рекуператором позволяет решить проблему догрева приточного воздуха за счёт тепла вытяжного, позволяя снизить нагрузку на систему отопления в 1,5 – 10 раз в зависимости от кратности воздухообмена;

– позволяет утилизировать тепло технологических процессов и направить его для внутренних нужд;

– позволяет минимизировать затраты на сушку разнообразных материалов;

– эффективно снижает эксплуатационные затраты в процессах выпаривания, дистилляции и разделения смесей.



Повышение потенциала потока осуществляется в большинстве случаев повышением давления, следовательно, повышается и температура потока [17]. Такие термотрансформаторы называются парокompрессионными и подразделяются на компрессионные открытого типа (рис. 1.2, 1.3) и компрессионные замкнутые (закрытого типа) (рис. 1.4, 1.5). В установках открытого типа не используется промежуточный теплоноситель, происходит повышение давления самого рабочего потока [6, 7, 17].

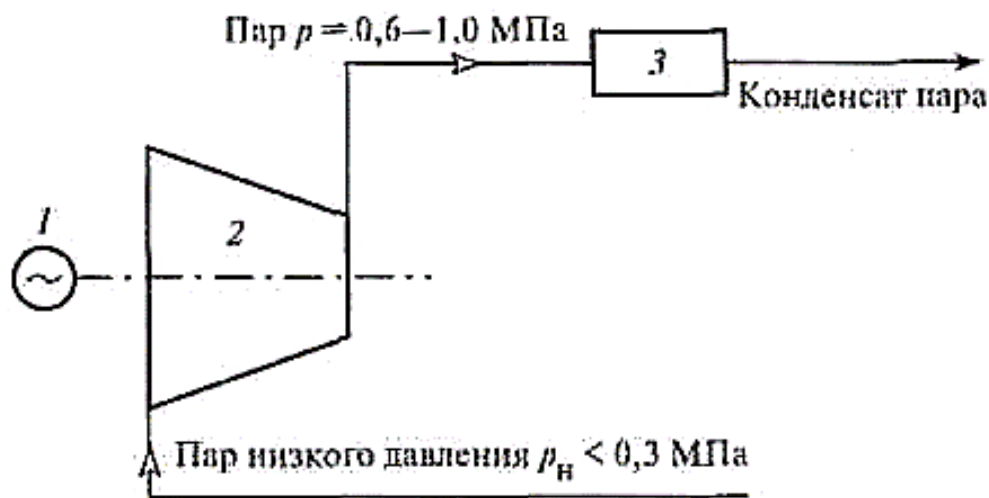


Рис. 1.2. Компрессионный трансформатор тепла открытого типа:  
1 – электродвигатель; 2 – компрессор; 3 – потребитель теплоты

Повышение давления потока пара может осуществляться также за счет подмешивания пара высокого давления. Пример: пароструйный компрессор (ПК) (рис. 1.3). Принципиальная схема установки для рекуперации низкопотенциального тепла (конденсата от технологических установок) приведена на рис. 1.3.

Работа установки происходит следующим образом. Пар к потребителю может поступать от источника непосредственно (линия 1) или через пароструйный компрессор (линия 2). В случае, если в конденсатный бак поступает горячий конденсат, пар от источника к потребителю направляется по линии 2 через пароструйный компрессор. ПК эжектирует пар, испаряющийся из горячего конденсата, и сжимает его до давления, требуемого потребителем.

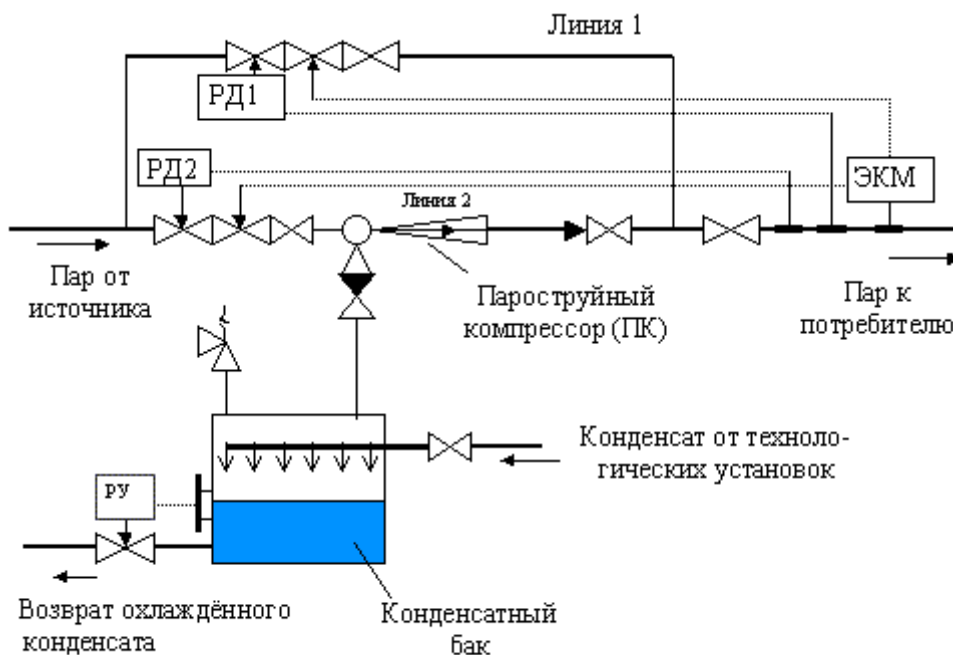


Рис. 1.3 Принципиальная схема пароструйного компрессора

При этом происходит частичное замещение расхода пара от источника, эжектируемым паром из конденсатосборника. Когда температура конденсата недостаточна и для его выпаривания требуется слишком низкое давление в конденсатосборнике, которое не может поддерживать ПК при заданном давлении пара на выходе из установки, линия 2 перекрывается и пар к потребителю направляется по линии 1 в пароструйные компрессоры.

В парокompрессионных термотрансформаторах (рис. 1.4) происходит повышение давления промежуточного теплоносителя. Сами же рабочие среды не взаимодействуют напрямую в одном аппарате. Вторичный энергоресурс отдает свою энергию промежуточному теплоносителю в испарителе 4, за счет чего промежуточный теплоноситель вскипает. Затем в компрессоре 1 происходит сжатие газообразного промежуточного теплоносителя и повышение его температуры. В конденсаторе 2 вырабатывается теплота за счет конденсации промежуточного теплоносителя. Далее происходит дросселирование промежуточного теплоносителя в 3 для возвращения исходных параметров и цикл повторяется.

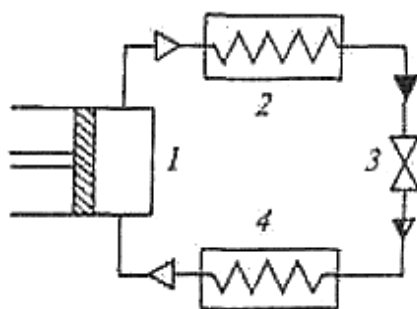


Рис. 1.4 Компрессионный трансформатор тепла закрытого типа:

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – дроссель; 4 – испаритель

Такой компрессионный термотрансформатор закрытого типа получил название теплонасосной установки (ТНУ) или теплового насоса [16].

Термодинамические процессы, происходящие в парокompрессионном термотрансформаторе закрытого типа, представлены на рис. 1.5.

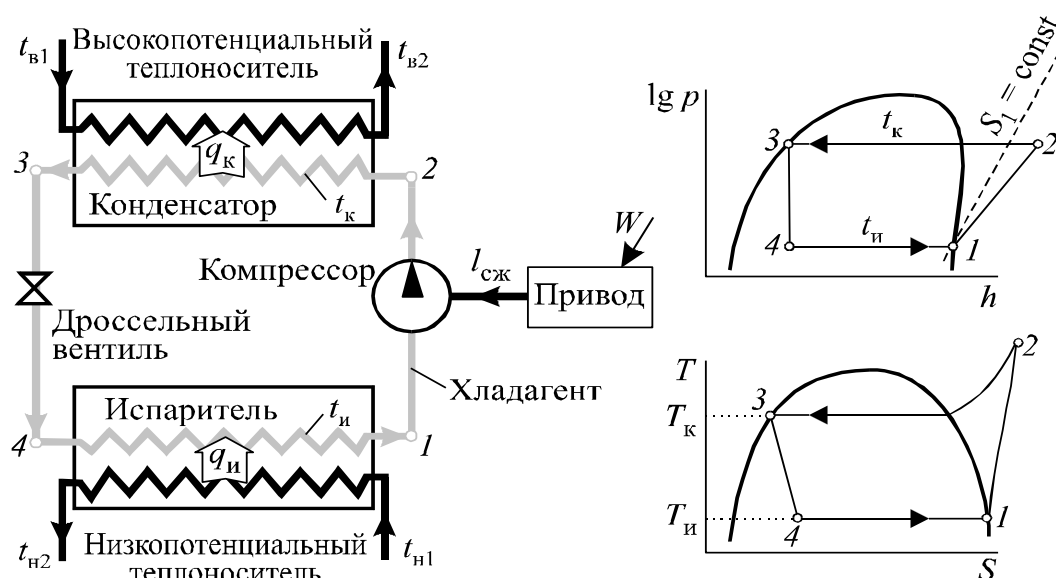


Рис. 1.5 Термодинамические процессы промежуточного теплоносителя в парокompрессионном термотрансформаторе закрытого типа:

1–2 – сжатие; 2–3 – охлаждение и конденсация; 3–4 – дросселирование;  
4–1 – испарение

Устойчивый избыток тепловых ВЭР на производствах наблюдается в летний период, когда происходит снижение теплотребления [23 – 26]. Излишки ВЭР, прежде всего низкопотенциальных, сбрасываются в атмосферу непосредственно при помощи оборотного водоснабжения или с использованием аппаратов воздушного охлаждения. Поэтому важной проблемой в летний период является эффективное использование сбрасываемых ВЭР.

В летний период на промышленных предприятиях возрастает нагрузка систем хладоснабжения. В связи с этим перспективным направлением использования низкопотенциальных ВЭР является выработка холода с использованием абсорбционных трансформаторов теплоты АТТ – понижающих термотрансформаторов [30-32].

Абсорбционные холодильные машины (АХМ) (рис. 1.6) вырабатывают высокотемпературный холод от  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  при использовании водяного пара давлением 0,15 МПа или горячей воды с температурой  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (конденсат или вода с ТЭЦ) [32]. В настоящее время получают распространение двухступенчатые АХМ, работающие на более высокотемпературном потоке дымовых газов.

Абсорбционная холодильная машина работает следующим образом (рис. 1.6). В испарителе, находящемся в охлаждаемой среде, из имеющегося в нем водоаммиачного раствора выделяются пары кипящего аммиака. Происходит это потому, что температура кипения аммиака при одинаковом давлении значительно ниже, чем воды (температура кипения аммиака при атмосферном давлении минус  $33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Выделяющиеся пары аммиака из испарителя непрерывно отсасываются в абсорбер (давление в абсорбере ниже, чем в испарителе) и поглощаются находящимся в абсорбере водоаммиачным раствором. Насыщение водоаммиачного раствора аммиаком сопровождается повышением температуры, что ухудшает растворимость аммиака.

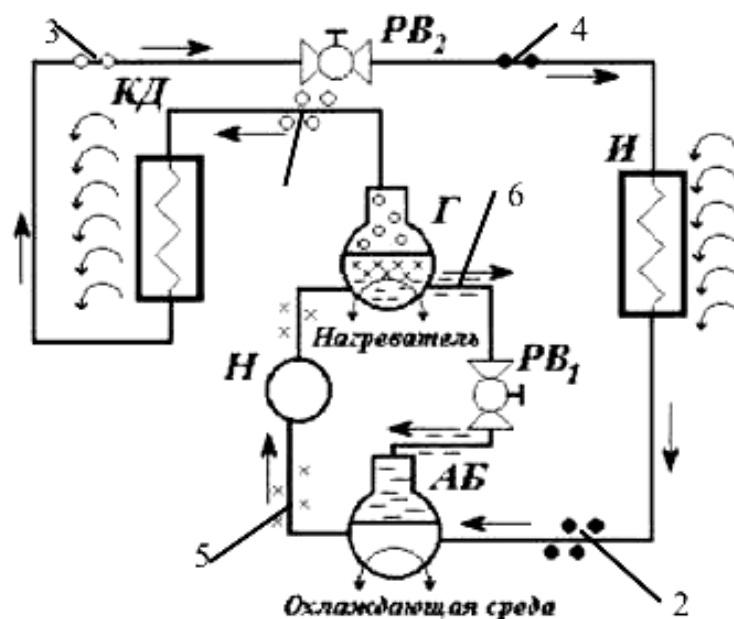


Рис. 1.6 Упрощенная схема абсорбционной холодильной машины:

- 1 – пар аммиака высокого давления; 2 – пар аммиака низкого давления;  
 3 – жидкий аммиак высокого давления; 4 – жидкий аммиак низкого давления;  
 5 – крепкий водоаммиачный раствор; 6 – слабый водоаммиачный раствор;  
 Г – генератор (кипятильник); АБ – абсорбер; КД – конденсатор;  
 И – испаритель; Н – насос; РВ1 и РВ2 – регулирующие вентили

Во избежание этого абсорбер охлаждают водой или окружающим воздухом, поддерживая тем самым активное насыщение аммиаком водоаммиачного раствора в абсорбере. Насыщенный аммиаком крепкий (концентрированный) водоаммиачный раствор абсорбционной холодильной машины перекачивается насосом в генератор (кипятильник), который обогревается каким-либо источником тепла (электронагревателем, паром и др.).

Вариант применения трансформатора теплоты в процессах сушки показан на рис. 1.7. Перед процессом сушки воздух всегда требует нагрева [7, 17] (рис. 1.7 а). Снизить затраты тепловой энергии на процесс подогрева воздуха возможно использованием теплоты отработанного воздуха [30 – 32] (рис. 1.7 б), потенциал которого повышается в термотрансформаторе (рис. 1.7 в).

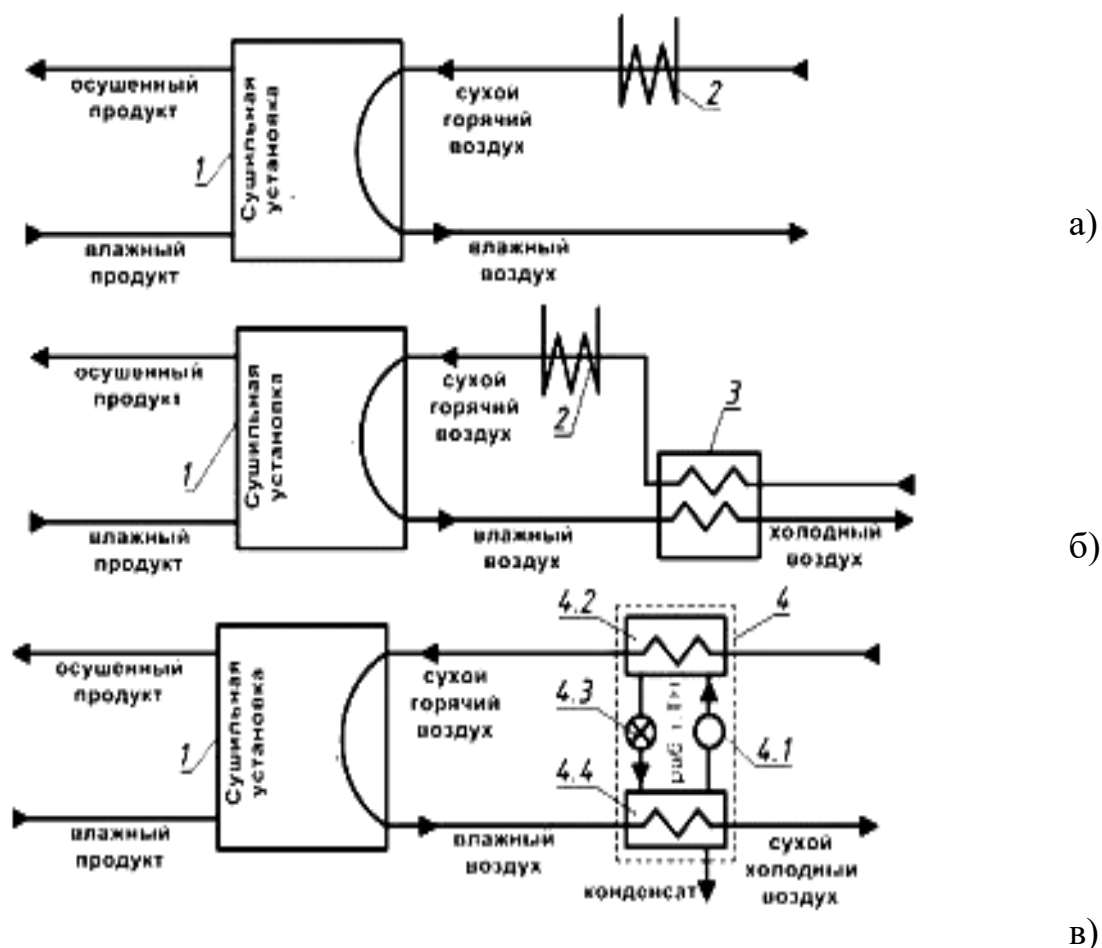


Рис. 1.7 Включение трансформатора теплоты в технологические процессы сушки:

а) схема подготовки воздуха для сушильной камеры;

б) схема подготовки воздуха для сушильной установки с рекуператором;

в) схема включения термотрансформатора;

1 – сушильная камера; 2 – нагреватель; 3 – рекуператор; 4 – тепловой насос;

4.1 – компрессор, 4.2 – конденсатор; 4.3 – дроссельный клапан;

4.4 – испаритель; раб.т. ТН – рабочее тело теплового насоса

Работа схемы включения теплового насоса для утилизации теплоты отработанного влажного воздуха сушильной части бумагоделательной машины, с целью доведения параметров влажного воздуха до требуемых параметров греющего сухого воздуха следующая (рис. 1.7 в): холодный воздух поступает в конденсатор теплового насоса, где он нагревается до необходимой температуры и направляется в сушильную камеру. В сушильной камере за счет

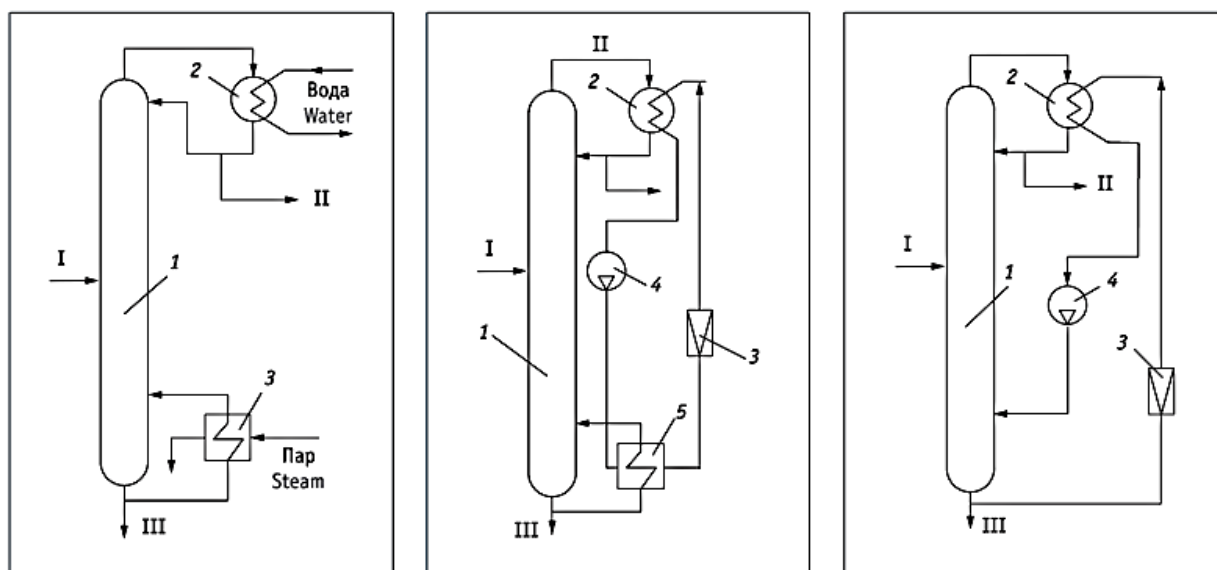
тепломассообмена температура воздуха понижается, а влагосодержание увеличивается. Происходит удаление влаги из продукта. Далее влажный воздух направляется в испаритель теплового насоса, где охлаждается. Одновременно с процессом охлаждения происходит удаление выпавшей влаги. В результате использования тепловых насосов в процессах сушки достигается экономия энергоресурсов до 80 %.

Применение термотрансформаторов в процессах разделения показано на рис. 1.8 [12, 33].

На рис. 1.8 а представлена классическая установка разделения с охлаждением верхнего продукта в конденсаторе 2 и нагревом нижнего продукта в ребойлере 3. Данная схема соответствует процессу получения спирта при производстве бумаги.

Производство спирта сопровождается выходом большого количества теплой воды после конденсации водно-спиртовых паров в дефлегматорах. В процессах разделения при производстве спирта вариантом включения теплового насоса является использование энергии верхнего продукта колонн для подогрева нижней части (рис. 1.8 а; рис. 1.8 б). В результате включения теплового насоса в схему производства спирта возможно снижение затрат энергии на разделение до 75 %. Также производство спирта сопровождается выходом большого кол-ва теплой воды после конденсации водно-спиртовых паров в дефлегматорах, но она не используется. Эту воду можно использовать для подогрева самой колонны.

На рис. 1.8 б используется тепловой насос с промежуточным теплоносителем, за счет чего поднимается потенциал потока верхнего продукта колонны и направляется на испарение нижнего продукта. На рис. 1.8 в предлагается использовать нижний поток колонны как теплоноситель, потенциал которого поднимается за счет нагрева в конденсаторе и сжатия в компрессоре. Данный вариант менее металлоемкий по сравнению с вариантом на рис. 1.3б – отсутствует испаритель внизу колонны [33].



а)

б)

в)

Рис. 1.8 Ректификационная колонна с тепловым насосом:

а) традиционная схема разделения: 1 – ректификационная колонна;

2 – конденсатор; 3 – ребойлер; I – разделяемая смесь; II – верхний продукт;

III – нижний продукт

б) разделение с применением промежуточного теплоносителя:

1 – ректификационная колонна; 2 – дефлегматор-испаритель; 3 – дроссельный

клапан; 4 – компрессор; 5 – подогреватель-конденсатор

в) разделение с тепловым насосом на энергии верхнего продукта колонны:

1 – ректификационная колонна; 2 – дефлегматор; 3 – дроссельный клапан;

4 – компрессор

Внедрение вышеперечисленных мероприятий, построение системы рекуперации сбросной энергии позволит повысить как энергетическую, так и технологическую эффективность рассматриваемого производства, обеспечит производство дополнительной выработкой энергетических ресурсов и позволит сэкономить значительное количество топлива, тепловой и электрической энергии.



### **1.3 Теплотехнологическая схема производства бумаги и картона**

Рассмотрим пример теплотехнологической схемы производства бумаги и картона (рис. 1.9 – 1.11).

В производстве картона в качестве сырья используют древесную массу и бумажную макулатуру. Технологическая схема подготовки макулатурной и древесной массы осуществляется по отдельным потокам.

Ниже представлено описание технологии производства. Принципиальная теплотехнологическая схема производства картона представлена на рис. 1.9 – 1.11. Схема представляет собой очень сложное образование из значительного количества элементов и связей между ними. Обозначения элементов схемы приведены в таблице 1.1.

Рассмотрим технологическую линию по производству картона. Макулатурный отдел предназначен для роспуска, очистки и сортирования макулатуры и получения макулатурной массы, которая используется в производстве картона.

#### **Размольно-подготовительный отдел (РПО)**

Технологическая схема подготовки макулатурной массы включает следующие стадии:

- роспуск макулатуры;
- очистка от тяжелых загрязнений;
- очистка от легких загрязнений;
- сгущение макулатурной массы.

Разрезанные и освобожденные от упаковочной проволоки кипы макулатуры поступают по транспортерам в гидроразбиватели ГРВ (1, 2, 3). Сюда же подается теплая обратная вода 30°С, которая собирается в бассейне обратной воды РПО (61) после сгустителей (14). Недостаток обратной воды пополняется очищенной водой с прудов-отстойников (83) и обратной водой с бассейна осветленной воды отдела подготовки массы (67).

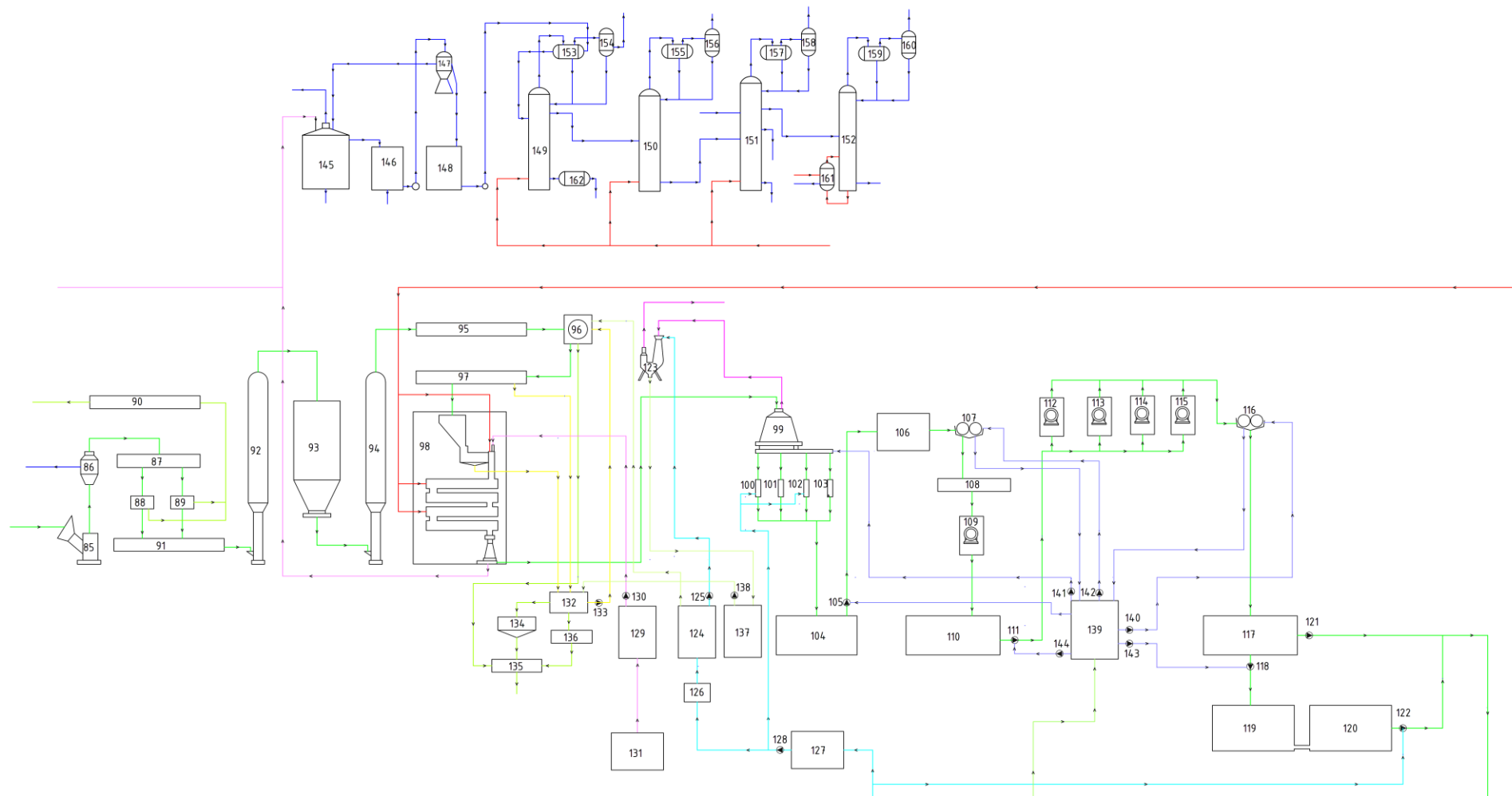


Рис 1.9 Теплотехнологическая схема производства бумаги и картона

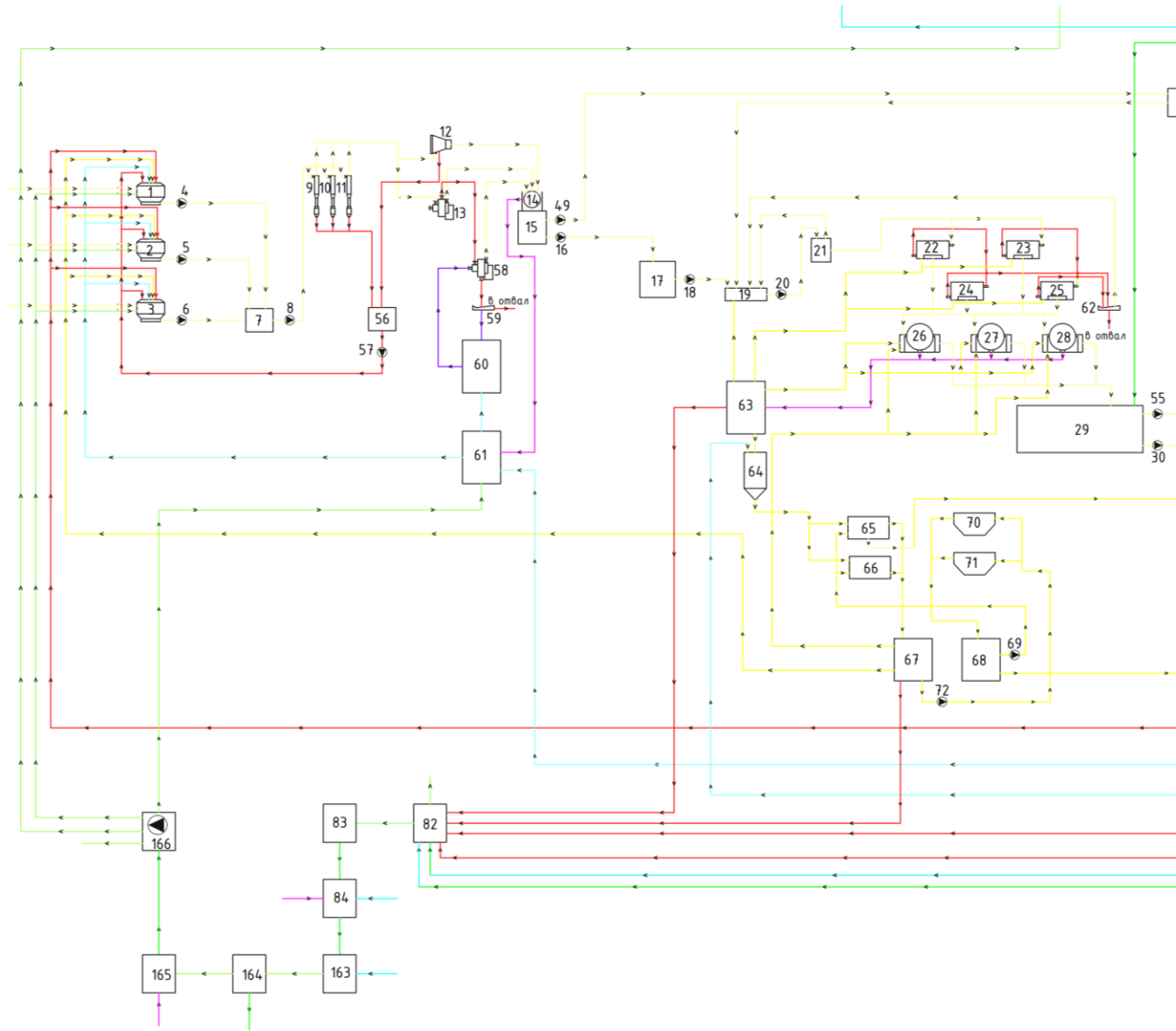


Рис 1.10 Теплотехнологическая схема производства бумаги и картона (продолжение)

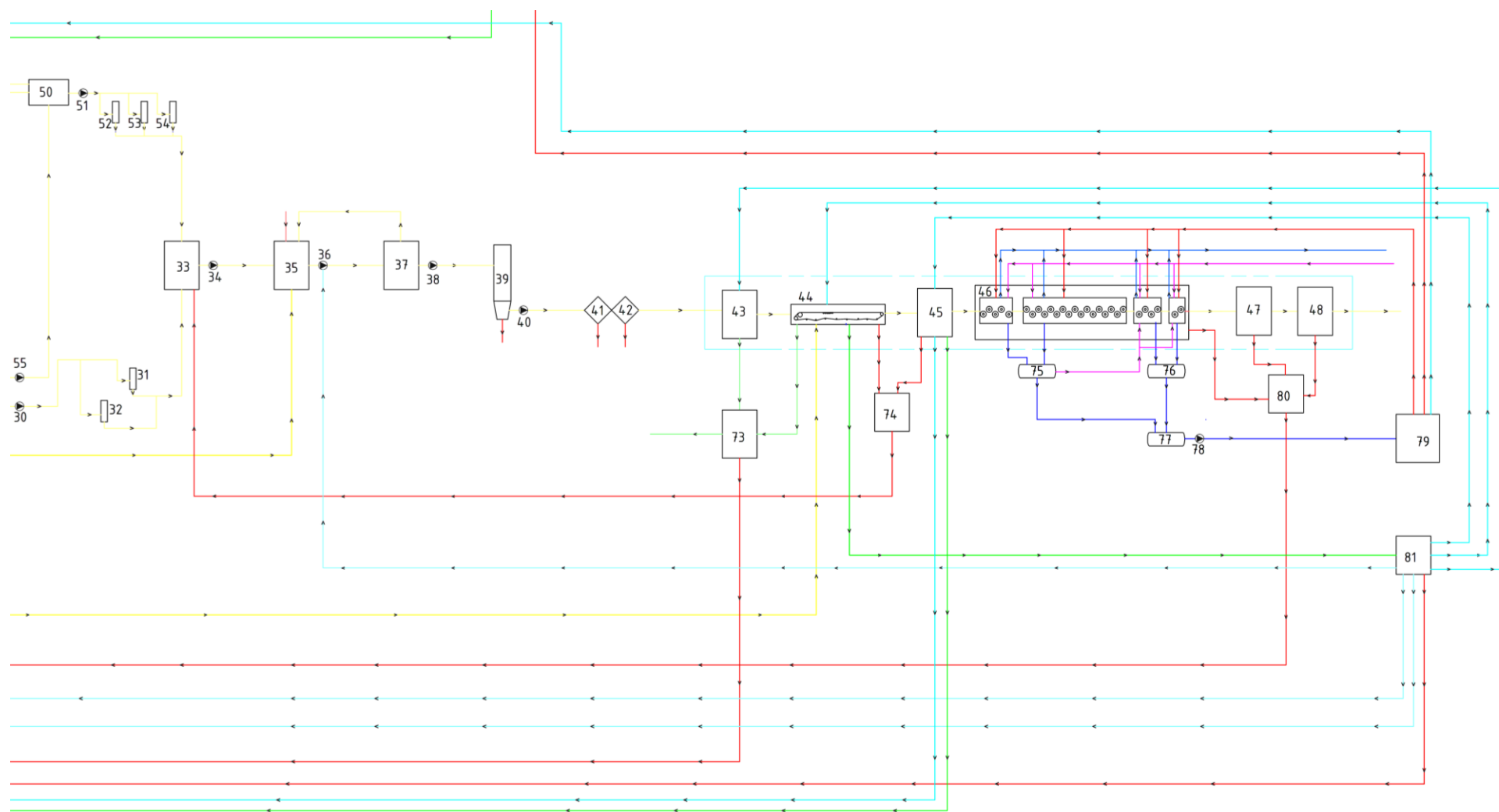


Рис 1.11 Теплотехнологическая схема производства бумаги и картона (продолжение)

Роспуск макулатуры осуществляется вследствие встречи лопастей вращающегося ротора с расположенными на днище ванны гидроразбивателей неподвижными планками. Концентрация волокнистой массы в ванне гидроразбивателей ГРВ (1, 2, 3) должна быть не более 3,0% и регулируется визуально путем подачи макулатуры или оборотной воды в ванну гидроразбивателей ГРВ (1, 2, 3).

Распушенная на волокна масса концентрацией 2,5 % насосами (4, 5, 6) перекачивается в аккумулирующий бассейн (7), из которого насосом (8) подается на вихревые низконапорные сортировки густой массы (9, 10, 11), где очищается от тяжелых загрязнений. Давление массы, поступающей на SVS-25, должно быть 2 – 2,5 кгс/см<sup>2</sup>. Перепад давления в очистителе не более 0,5 – 0,8 кгс/см<sup>2</sup> (50-80 кПа).

Очищенная от вышеперечисленных включений волокнистая масса подаётся на сепараторы VDT-30 (13) и ГРСГ-200 (12), работающие параллельно друг с другом. Чистая масса концентрацией 3,5% с сепараторов (12,13) поступает на сгуститель (14) и далее в массный бассейн РПО (15). Из массного бассейна РПО (15) масса насосом (16) подается в массный бассейн отдела подготовки массы ОПМ (17).

### **Отходы и оборотная вода РПО**

Отходы от сортировок SVS-25 (9,10,11) и сепараторов VDT-30 (13) и ГРСГ-200 (12) поступают в бассейн грубой массы (56), а далее насосом (57) подаются на гидроразбиватели ГРВ (1, 2, 3). Также часть отходов после сепаратора VDT-30 (13) поступает на вихревой сепаратор VSV-20 (58) с целью окончательного сортирования отходов. Очищенная масса с VSV-20 (58) поступает в массный бассейн РПО (15) через сгуститель (14). Промытые, чистые отходы с VSV-20 идут на вибросортировку (59), работающую в режиме обезвоживания, и далее на транспортерную ленту с последующим вывозом в отвал.

Для промывки отходов на VSV-20 (58) поступает обратная вода 30 °С из бака постоянного уровня БРПУ воды (60). Вода в БПУ воды (60) подаётся насосом из бассейна оборотной воды (61).

### **Отдел подготовки массы ОПМ**

Для производства бумаги используются волокнистые полуфабрикаты:

- древесная масса;
- макулатурная масса.

Древесная масса из древесно-подготовительного участка цеха основного производства с концентрацией 2,5 – 3,2 % и степенью помола  $28 \pm 2^\circ$  ШР поступает в бассейн сгущенной массы ОПМ (29). Количество поступающей массы регулируется соответствующими электрифицированными задвижками.

В отделе подготовки массы ведется сортирование, сгущение, аккумулярование и размол макулатурной массы.

### **Сортировка макулатурной массы**

Макулатурная масса концентрацией 3,5 % из массного бассейна ОПМ (17) насосом (18) подается в массный канал (19), где разбавляется до концентрации 0,9 % оборотной водой 30 – 40 °С из бассейна оборотной воды ОПМ (63). Затем волокнистая макулатурная масса насосом (20) подается в напорный ящик ОПМ (21), откуда самотеком поступает на сортировки марки СЦ-08 (22, 23, 24, 25), где происходит ее сортирование в две ступени. Перелив массы из напорного ящика (21) возвращается в массный канал (19).

Отсортированная масса подается на сгущение.

### **Сгущение макулатурной массы**

Сгущение макулатурной массы производится на сгустителях (26, 27, 28).

Со сгустителей (26, 27, 28) макулатурная масса самотеком поступает в бассейн сгущенной массы ОПМ (29), куда также поступает древесная масса из древесно-подготовительного участка цеха основного производства с концентрацией 2,5 - 3,2 %. В бассейне сгущенной массы ОПМ (29) картонная масса аккумуляруется при концентрации 4,0 %.

Из бассейна сгущенной массы ОПМ (29) картонная масса насосом (30) подается на дисковые мельницы МД-31 и МД-14 (31,32), работающие последовательно. Размолотая картонная масса степенью помола 24-30 ШР поступает на 3 этаж ОПМ в композиционный бассейн картонно-делательной машины КДМ (33), откуда насосом (34) масса с концентрацией 2,5 % поступает в машинный бассейн КДМ (35).

Готовая картонная масса из машинного бассейна (35) через насос (36) подаётся в переливной бак КДМ (37) и далее на трёхступенчатую очистку от тяжёлых включений на УВК (39) и на улавливание пучков и узелков на узлоловители УЗ-12 (41,42), после чего очищенная масса поступает в коллектор напорного ящика КДМ (43).

### **Отходы и оборотная вода ОПМ**

Для разбавления и улучшения выхода отходов сортирования на сортировки (22, 23, 24, 25) подается теплая оборотная вода 30 - 40 °С из бассейна оборотной воды ОПМ (63).

Отходы после сортирования с сортировок (22, 23, 24, 25) направляются на вибросортировку (62). Отходы после вибросортировки (62) уходят в отвал, а отсортированная масса поступает обратно на сортировки (22, 23, 24, 25) через массный канал (19).

Оборотная вода со сгустителей (26, 27, 28) собирается в бассейне оборотной воды ОПМ (63) и используется на разбавление массы перед сортировками сортировки (22, 23, 24, 25), после сгустителей (26, 27, 28) и в массном канале (19).

Избыток оборотной воды из бассейна оборотной воды ОПМ (63), а также избыток оборотной воды с КДМ направляется на очистку в напорный бак дискового фильтра FS-140 (64). Уровень воды в дисковом фильтре должен поддерживаться не выше верхнего уровня карманов для выхода с фильтра уловленной массы. Для промывки сеток сегментов дискового фильтра и для смыва массы с сеток сегментов дискового фильтра используются качающиеся спрыски, работающие на осветленной воде, которая скапливается в бассейне

осветленной воды 68) после флотоловушки (70,71). Масса, уловленная на дисковом фильтре (65,66), поступает в бассейн (35), откуда насосами перекачивается в КДМ.

### **Приготовление и подача химикатов**

Для придания бумаге механической прочности в массу добавляется катионный крахмал. Готовый крахмальный клей подается в смесительную емкость перед композиционным машинным бассейном (35). Для придания бумаге гидрофобных свойств в макулатурную массу подаётся проклеивающий реагент АКД (димер алкилкетена). Проклейка ведется в нейтральной среде при рН 6,7-7,3.

### **Отлив и формование картонного полотна**

Через конический потокораспределитель и коллектор картонная масса поступает в напорный ящик закрытого типа КДМ (43) и через выпускную щель подаётся в сеточную часть КДМ (44) на сеточный стол, где происходит непрерывное формование полотна и удаление из него воды через ячейки сетки; на грудной доске и гидропланках за счёт свободного стекания воды и гидродинамического действия гидропланок. А когда вода не отбирается естественным путём, то через отсасывающие ящики путём создания разряжения (вакуума) на отсасывающих ящиках и гауч-вале. Сухость картонного полотна после гауч-вала – 23%.

После сеточной части КДМ (44) картонное полотно путём пересасывания поступает на прессовую часть машины (45), где подвергается дальнейшему обезвоживанию и уплотнению за счёт вакуума и давления. Транспортировка картонного полотна осуществляется посредством прессовых сукон. Для удерживания прессовых сукон пресса оснащены сукноведущими валиками, секцией натяжения сукон и секцией правки сукон, системой sprысков для промывки сукон и сукномойками для удаления воды посредством создания вакуума внутри сукномоек. Сухость полотна после прессовой части (45) – 43%. Далее картонное полотно сухостью 43% поступает на самый энергоёмкий участок производства - в сушильную часть КДМ (46), где происходит процесс



испарения из него влаги и сближения волокон под влиянием происходящей при сушке усадки бумаги. При этом окончательно формируются силы, определяющие основные свойства бумажного полотна и завершается процесс проклейки. Сушильная часть КДМ (46) состоит из 28 сушильных цилиндров и делится на 6 сушильных групп по приводу. Диаметр сушильных цилиндров 1500 мм. Схема КДМ представлена на рис.1.12.

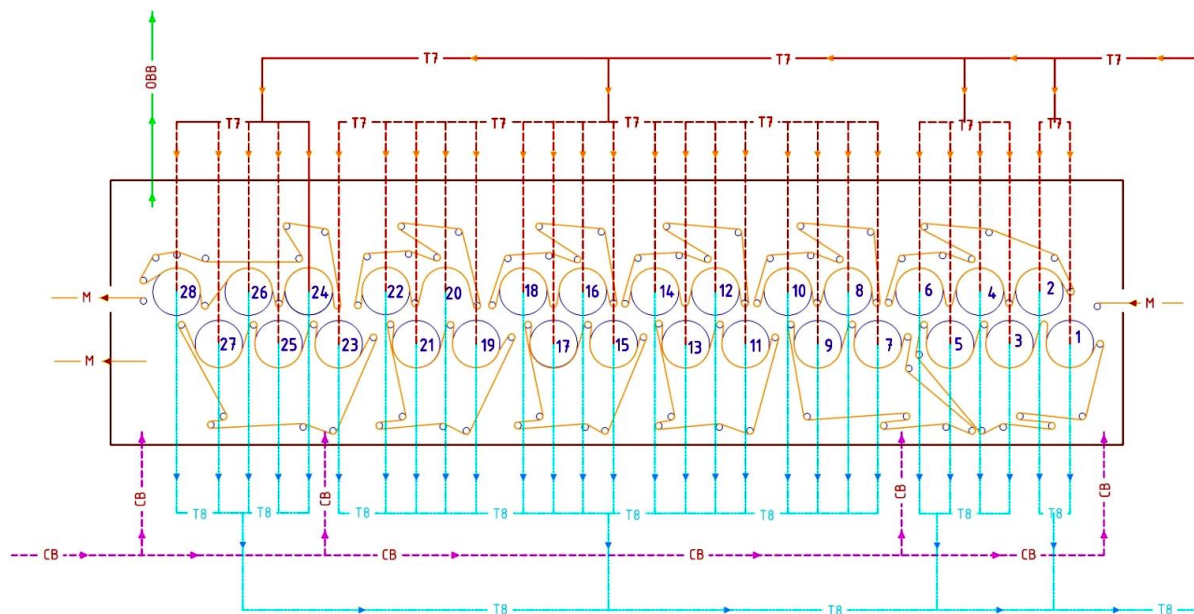


Рис 1.12 Схема-картоноделательной машины

1 – 28 – сушильные цилиндры; М – картонное полотно на вход;  
 М-М – картонное полотно на выходе; Т7 – пар; Т8 – конденсат из цилиндров;  
 СВ – сушильный воздух; ОВВ – отработанный влажный воздух после  
 сушильной части

Параметры потоков схемы следующие:

М – сухость 43%, температура  $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $p = 0,11 \text{ МПа}$ , расход  $G = 13284,93 \text{ кг/ч}$ ;

М-М – сухость 93%, температура  $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $p = 0,11 \text{ МПа}$ , расходы  $G_1 = 6025,83 \text{ кг/ч}$  и  $G_2 = 116,67 \text{ кг/ч}$ ;

Т7 – температура  $T = 142,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $p = 0,304 \text{ МПа}$ , расход  $G = 11409,68 \text{ кг/ч}$ ;

Т8 – температура  $T = 132,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $p = 0,295 \text{ МПа}$ , расход  $G = 11409,68 \text{ кг/ч}$ ;

СВ – температура  $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление  $p = 0,11\text{ МПа}$ , расход  $G = 102672\text{ кг/ч}$ ;  
ОВВ –  $T = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление  $p = 0,11\text{ МПа}$ , расход  $G = 109814,44\text{ кг/ч}$  ( $G_{\text{ВОЗДУХА}} 102672\text{ кг/ч}$ ,  $G_{\text{ВЛАГИ}} 7142,44\text{ кг/ч}$ ).

Каждая сушильная группа снабжена сушильными сетками, сетководущими валиками, механизмом натяжения и правки сукон. По пару сушильная часть разделена на 4 группы:

- 1 группа – с 7 по 23 цилиндр;
- 2 группа – с 24 по 28 цилиндр;
- 3 группа – 3 по 6 цилиндр;
- 4 группа – 1 и 2 цилиндры.

Пар с давлением  $0,3\text{ МПа}$  и температурой  $142,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сушильную часть КДМ 46 поступает по паропроводу с теплового пункта участка тепловодоснабжения ТВС 79.

Конденсат  $p = 0,295\text{ МПа}$  и  $T = 132,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  1 и 2 группы сушильных цилиндров собирается в баке конденсата 75. Конденсат 3 и 4 группы сушильных цилиндров собирается в баке конденсата 76. В 3-ю и 4-ю сушильные группы КДМ предусмотрена подача паров вскипания из конденсатного бака 75, в котором происходит процесс снижения давления паро-конденсатной смеси за счет резкого увеличения объема, в результате чего происходит вскипание смеси и образуется вторичный пар. Вторичный пар поступает в сушильные цилиндры 3 и 4 группы, а оставшийся конденсат за счет разницы давлений поступает в бак конденсата 77. Из бака конденсата 76 конденсат также подается в бак сбора конденсата 77.

После сушильной части КДМ картонное полотно сухостью 93 % поступает на двухвальный машинный каландр и периферический накат 47. Машинный каландр позволяет улучшить поверхность полотна и повысить механические свойства. На периферическом накате осуществляется намотка бумаги на тамбурный валик. При этом должна быть обеспечена равномерная и плотная намотка, что создает условия для хорошей сохранности бумаги при ее транспортировке и переработке.

После периферического наката 47 картонное полотно поступает на продольнорезающий станок 48, а далее на упаковку и на склад.

После упаковки и маркировки рулоны транспортируются на склад готовой продукции.

### **Отходы производства, сточные воды**

Сточные воды с производства (с цеха производства картона и цеха производства полуфабрикатов) поступают в приемный колодец сточных вод. Сначала производится механическая очистка сточных вод в прудах-отстойниках 82. На стадии механической очистки сточные воды подвергаются также обеззараживанию.

После механической очистки 82 все сточные воды поступают на усреднитель 83, где осуществляется их перемешивание и усреднение по составу, а также насыщение кислородом воздуха. Далее сточные воды единым потоком поступают на биологическую очистку.

Биологическая очистка сточных вод производится в три ступени. На 1 ступени биологическая очистка сточных вод производится в биореакторе 84 с использованием технологии прикрепленной микрофлоры. Объем плавающих насадок составляет 17 % от объема биореактора. Для обеспечения жизнедеятельности микроорганизмов и перемешивания насадок в биореактор подается воздух. В качестве биогенного питания используется аммиак водный и раствор аммофоса. На 2 и 3 ступенях биологическая очистка сточных вод производится последовательно в аэротенках 163 с использованием активного ила. Для насыщения иловой смеси кислородом и поддержания ила во взвешенном состоянии в аэротенки 163 подается воздух.

Осаждение ила осуществляется на вторичных отстойниках 164. Осветленная вода после вторичных отстойников 164 поступает на физико-химическую очистку 165. Этот этап проходит в реагентном смесителе и в камере хлопьеобразования и позволяет удалить из воды высокомолекулярные соединения лигнина и его производные.

Избыточный активный ил и осадок от механической очистки сточных вод направляются для уплотнения на илоуплотнители и далее на обезвоживание на пресс-фильтры. Обезвоженный осадок и избыточный активный ил размещаются на свалке промышленных отходов предприятия.

Теперь рассмотрим более подробно технологический процесс цеха первичных полуфабрикатов – производство полуцеллюлозы, полученной путем варки щепы древесины лиственных пород содово-натронным способом, предназначенной для использования в композиции производства бумаги для гофрирования, переплетного и коробочного картона.

Проектная мощность– 145 тонн сухой полуцеллюлозы в сутки.

### **Приемка, рубка, сортирование и хранение щепы**

Древесное сырье на предприятие поступает автомобильным транспортом. Выгрузка 6-тиметрового баланса производится на указанную кладовщиком ячейку хранения. Выгрузка отходов древесины от фанерного производства и 2-х метрового баланса в коре производится непосредственно у транспортера, где он сразу же подается на рубку.

После распиловки баланс длиной 2 м и диаметром не более 0,40 м подается на раскатной стол погрузчиком и по цепному конвейеру подается в зону рубки загрузочного патрона рубительной машины 85. Щепка из кожуха рубительной машины 85 потоком воздуха, созданным вращением ножевого диска, по касательной поступает в циклон 86 и падает на скребковый конвейер 87. Циклон 86 служит для удаления пыли.

Далее происходит сортировка щепы. Сортировка щепы производится на двух плоских односитовых сортировках 88, 89 с отверстиями в сите 39\*39 мм. Щепка разделяется на две фракции – крупную и варочную. Мелкая щепка и опилки не отделяются и вместе с нормальной щепкой идут на варку. Вместе с крупной щепкой на сортировке отделяются крупные посторонние предметы и примеси: обрезки древесины, досок, которые отделяются на сито сортировки, поступают на ленточный конвейер крупной щепы 90 и удаляются за пределы цеха.

Щепа от сортировок 88, 89 в силос 93 подаётся ленточным транспортёром 91 и цепным элеватором 92. Для устранения зависания щепы на силосе 93 в его нижней конической части установлены 4 вибратора.

Щепа, нагружаемая от силоса 93 тарельчатым разгрузчиком, по наклонному лотку поступает к цепному элеватору 94, который подаёт её в варочный отдел на установку для промывки 96.

### **Промывка щепы**

На установке для промывки 96 производится очистка щепы от тяжёлых посторонних примесей: металлического лома, щебня и т. п., а также песка. Промытая щепа обезвоживается на шнековом транспортёре с перфорированным днищем 97, и направляется в бункер варочного аппарата 98, а вода от транспортёра 97 – в бак обратной воды 132. В моечную ванну установки для промывки 96 предусматривается подача оборотной воды из бака обратной воды 132, а также предусмотрена подача горячей воды из бака горячей воды от оборудования 124.

Перелив грязной оборотной воды из бака обратной воды 132 направляется для отделения опилок на барабанный сгуститель СБ-15 134. Крупные примеси, удаляемые из щепы при промывке, а также песок выгружаются с установки для промывки 96 и барабанного сгустителя СБ-15 134 на скребковый транспортёр 135 и удаляется за пределы цеха. Транспортёр смонтирован в наклонном положении с уклоном по ходу удаляемых отходов вверх.

### **Варка щепы**

Наиболее энергоёмким участком цеха первичных полуфабрикатов является участок варки щепы. Варка щепы осуществляется в 4-хтрубном варочном аппарате непрерывного действия 98.

Щепа, подаваемая в варочный аппарат 98, сразу попадает в зону действия высокой температуры, при которой происходит пропарка. Давление поступающего пара в варочный аппарат 98 устанавливается пневмоклапаном, находящимся в начале паропровода, на уровне 0,15 МПа. Варочный раствор из

баков хранения 131 закачивается в расходный бак 129, находящийся в варочном отделе. Из бака 129 раствор подается в головку варочного аппарата 98 центробежными насосами 130.

Избыток влаги из мокрой щепы отжимается через отверстие в ножевом конусе и отводится в бак оборотной воды 132. Количество щепы, подаваемой к аппарату на варку, и соответственно этому производительность аппарата, регулируется путём изменения числа оборотов шнекового питателя с пульта управления аппаратом.

Сваренная полуцеллюлоза через разгрузочное устройство варочного аппарата 98 непрерывно выдувается в выдувной резервуар 99. Выдувка происходит за счет разницы давлений в варочном аппарате и выдувном резервуаре. Из выдувного резервуара 99 полученная полуцеллюлоза подается на мельницы горячего размола.

Пары вскипания, образующие в выдувном резервуаре 99, направляются на скруббер «Вентури» 123, предназначенный для промывки от летучих веществ и улавливания тепла паров вскипания.

Размолотая полуцеллюлоза, выходящая с мельниц 100, 101, 102, 103, разбавляется до концентрации 3,0 – 4,0 % поступает в массный бассейн 104 емкостью 100 м<sup>3</sup>.

### **Промывка полуцеллюлозы**

Полуцеллюлоза на промывку забирается из массного бассейна 104 массным насосом 105, где несколько разбавляется отработанным раствором из бака фильтрата 139 и подаётся в разбавительный бачок 106.

Далее полуцеллюлоза из разбавительного бачка 106 поступает а сгустители 107, где происходит первая ступень промывки полуцеллюлозы с целью отделить из полуцеллюлозы отработанный раствор.

Отработанный раствор (фильтрат со сгустителей) от разных ступеней промывки собирается в баке фильтрата 139. Пополнение бака фильтрата 139 происходит очищенной оборотной водой 30 – 40 °С производства.

Отжатая на 1-й ступени промывки со сгустителя 107 масса подается шнековым транспортером 108 на размол на мельнице 109, которая позволяет производить размол массы при концентрации 10 – 30 %. После размола полуцеллюлоза поступает в массный бассейн.

### **Холодный размол полуцеллюлозы**

Целью холодного размола является размол полуцеллюлозы на дисковых мельницах 112, 113, 114, 115 перед 2-й ступенью промывки.

Масса на холодный размол подаётся из бассейна 110 смесительным насосом (111).

Размол ведётся при давлении массы 1 – 1,5 кгс/см<sup>2</sup> и концентрации размола 3,0 – 3,5 %.

### **Отжим отработанного раствора из размолотой полуцеллюлозы**

Отжим отработанного раствора – 2-я ступень промывки полуцеллюлозы производится на двухбарабанном сгустителе 116. Отжимаемая масса подается в сгуститель 116 прямо с мельниц 112, 113, 114, 115 без промежуточной ёмкости и без напорного бачка.

Отжатая масса из сгустителя 116 разбавляется с водой из бака фильтрата 139 до концентрации 2,8 – 3,0 % и поступает в бассейн 117 емкостью 200 м<sup>3</sup>, а из него в бассейн 5, 6 119, 120 и далее насосом 122 подаётся в отдел подготовки массы ОПМ цех производства картона. Предусмотрена перекачка массы в цех производства картона из цеха первичных полуфабрикатов напрямую из бассейна 117 насосом 121.

### **Отходы производства цеха первичных полуфабрикатов**

От промывки щепы варочно-промывного отдела образуются твердые отходы (песок, опилки), которые вывозятся в отвал.

Пары вскипания из выдувного резервуара 99 направляются на промывку и теплоулавливание в скруббер «Вентури» 123. Пары вскипания содержат уксусную кислоту, скипидар, фурфурол, которые растворяются в воде при промывке паров.

В цехе первичного полуфабриката имеется три источника выбросов вредных веществ в атмосферу. Один – со скруббера «Вентури», остальные два – выбросы от вентиляционных установок.

### **Цех по производству спирта**

Выделение этилового спирта из бражки и его очистку осуществляют на 4-х колонном аппарате.

В головной чан 145 для брожения поступает сусло и дрожжевая суспензия. Технологический режим брожения:  $t = 32 - 34$  °С,  $pH = 3,8 - 4,2$ , время брожения 5 – 7 часов. Выделяющаяся на поверхности жидкости углекислота из бродильного чана 145 поступает на установку для получения жидкой или твердой углекислоты, которая используется для получения химических продуктов или выпускается в атмосферу. Частично сброженное древесное сусло вместе с дрожжами передается из головного бродильного чана 145 в хвостовой чан 46, где брожение заканчивается. Поскольку концентрация сахара в хвостовом чане 146 небольшая, брожение в нем идет менее интенсивно, и часть дрожжей, не успевая образовать пузырьки углекислоты, оседает на дно чана 146. Чтобы не допустить этого, в хвостовом чане 146 устраивают часто принудительное перемешивание жидкости мешалками или центробежными насосами. Мёртвые дрожжи выводят и сбрасывают в канализацию.

Спиртовую бражку подают на сепарацию, где отделяют дрожжи. Дрожжи вновь направляют на брожение. Спиртовую бражку после сепаратора 147 собирают в сборнике спиртовой бражки 148 и далее подают в бражную колонну 149 для выделения спиртового конденсата.

Спиртовая бражка, нагретая в дефлегматоре 153 до температуры, близкой к температуре кипения спирта, поступает в питающую тарелку бражной колонны 149. Основная функция этой колонны 149 состоит в максимальном исчерпывании из раствора всех летучих компонентов. Дистиллят бражной колонны 149 поступает на эпурационную колонну 150. На верхних тарелках бражной колонны 149 в жидкой фазе содержится 20 – 40 % спирта. Из кубовой



части бражной колонны 149 выходит обесспиртованная сульфитно-спиртовая барда, являющаяся отходом производства. Содержание спирта в барде составляет не более 0,02 %. Обогрев бражной колонны 149 ведут паром. Бражная колонна 149 в верхней укрепляющей части заканчивается дефлегматором 153, в котором конденсируются пары водноспиртовой смеси, поступающие с верхней тарелки колонны 149. Низкокипящие фракции, состоящие из спирта, альдегидов и эфиров, проходят через дефлегматор 153 и окончательно конденсируются в конденсаторе 154, откуда в виде флегмы стекают обратно в колонну 149. Неконденсирующиеся газы, состоящие из углекислого газа, после конденсатора 154 удаляются.

Бражной дистиллят подается на эспурационную колонну 150, которая имеет дефлегматор 155 и конденсатор 156. Снизу в эспурационную колонну 150 подается пар. Освобожденный от основной части головных примесей водно-спиртовой раствор направляется в ректификационную колонну 151. Пары эфиров и альдегидов поднимаются после эспурационной колонны 150 в дефлегматор 155. Часть конденсата в виде флегмы с концентрацией спирта 65 – 90 % возвращают в эспурационную колонну 150, а часть укрепленной эфиральдегидной фракции отправляют в конденсатор 156.

В ректификационной колонне 151 осуществляют укрепление спиртового конденсата. Обогрев колонны 151 ведут острым паром, подающимся в нижнюю часть колонны 151 и который постепенно вываривает спирт из спиртового конденсата, стекающего в низ колонны 151. Освобожденная от спирта жидкость, называемая лютером, уходит в канализацию. Содержание спирта в лютере составляет не более 0,02 %. Над верхней тарелкой ректификационной колонны 151 устанавливается дефлегматор 157. Несконденсировавшиеся в нем пары окончательно конденсируются в конденсаторе 158 и стекают обратно в колонну 151. Для освобождения этилового спирта от летучих органических кислот в колонну 151 подается 10 %-ный раствор едкого натра, который нейтрализует кислоты на средних тарелках укрепляющей части колонны. В средней части ректификационной колонны (151), где крепость спирта

составляет 45 – 50 %, накапливаются сивушные масла, которые отбираются. Сивушные масла представляют собой смесь высших спиртов (бутиловый, пропиловый, амиловый), образовавшихся из аминокислот. Этиловый спирт, освобожденный от эфиров и альдегидов, а также сивушных масел, отбирается с укрепляющей части ректификационной колонны 151 и поступает на метанольную колонну 152. Спирт-сырец, поступающий из ректификационной колонны 151, содержит около 0,7 % метилового спирта.

По техническим условиям на этиловый спирт, вырабатываемый заводами, в нем должно содержаться не более 0,1 % метилового спирта. Исследования показали, что легче всего метиловый спирт отделяется из спирта-сырца при минимальном содержании в нем воды. По этой причине в метанольную колонну 152 подают спирт-сырец с максимальной крепостью 94 – 96 % этанола). Выше 96 % этиловый спирт получить на обычных ректификационных колоннах нельзя, так как этой концентрации отвечает состав нераздельнокипящей водоспиртовой смеси. В метанольной колонне 152 легкокипящей фракцией является метанол, который поднимается в верхнюю часть колонны 152, укрепляется в дефлегматоре 159. Этиловый спирт, стекая по тарелкам, опускается в нижнюю часть метанольной колонны 152 и сливается в приемники готовой продукции. Обогревают метанольную колонну 152 глухим паром в выносном подогревателе 161, который установлен таким образом, что по принципу сообщающихся сосудов его межтрубное пространство залито спиртом. Поступающий в подогреватель 161 водяной пар нагревает спирт до кипения и образующиеся спиртовые пары идут на обогрев колонны 152. Пар, поступающий в подогреватель 161, конденсируется в нем и в виде конденсата сливается в канализацию.

Таблица 1.1

## Элементы теплотехнологической схемы производства бумаги и картона

№ элемента	Использованное оборудование
1	2
1, 2, 3	Гидроразбиватели
4, 5, 6	Насосы
7	Аккумулирующий макулатурный бассейн
8	Насос
9,10,11	Вихревой очиститель макулатурной массы
12	Сортирующий гидроразбиватель (турбосепаратор)
13	Сепаратор
14	Сгуститель
15	Масный бассейн
16	Насос
17	Масный бассейн
18	Насос
19	Масный канал
20	Насос
21	Бак постоянного уровня (напорный ящик)
22,23,24,25	Сортировки марки
26,27,28	Сгустители
29	Бассейн сгущенной массы
30	Насос
31,32	Дисковые мельницы
33	Бассейн композиционной массы
34	Насос
35	Машинный бассейн
36	Насос
37	Бак постоянного уровня КДМ
38	Насос
39	Очистка от тяжелых включений
40	Насос
41,42	Узловител
	КДМ
43	Напорный ящик КДМ
44	Сеточная часть КДМ
-	Участок предварительного обезвоживания
-	Отсасывающие ящики
-	Гауч-вал
45	Прессовая часть КДМ
46	Сушильная часть КДМ
-	1-я группа цилиндров сушильной части
-	2-я группа цилиндров сушильной части
-	3-я группа цилиндров сушильной части
-	4-я группа цилиндров сушильной части
47	Машинный каландр и периферический накат
48	Продольно резательный станок
49	Насос
50	Масный бассейн

1	2
51	Насос
52,53,54	Дисковые мельницы
55	Насос
56	Бассейн грубой массы (отходов)
57	Насос
58	Сепаратор
59	Вибросортировка
60	БПУ воды РПО
61	Бассейн оборотной воды РПО
62	Вибросортировка
63	Бассейн оборотной воды ОПМ
64	Напорный бак дискового фильтра
65,66	Дисковый фильтра
67	Бассейн осветленной воды
68	Бассейн осветленной воды
69	Насос
70,71	Флотаторы
72	Насос
73	Бассейн подсеточной воды КДМ
74	Бассейн мокрого брака
75	Бак для конденсата
76	Бак для конденсата
77	Бак для конденсата
78	Насос
79	Станция ТВС
80	Бассейн сухого брака
81	Бассейны оборотной воды КДМ
82	Механическая очистка стоков (пруды-отстойники)
83	Усреднитель
84	Биореактор
85	Рубительная машина
86	Циклон
87	Скребокый транспортер
88,89	Сортировка для щепы
90	Ленточный транспортер крупной щепы и отходов
91	Ленточный транспортер варочной щепы
92	Цепной элеватор
93	Силос для щепы
94	Цепной элеватор
95	Ленточный транспортер варочной щепы
96	Установка для промывки щепы
97	Шнековый транспортёр с перфорированным днищем
98	Варочный аппарат
-	Бункер аппарата
-	Шнековый питатель аппарата
-	Варочные трубы
-	Разгрузочное устройство
99	Выдувной резервуар
100,101,102,103	Дисковая мельница

1	2
104	Массный бассейн
105	Насос
106	Разбавительный бачок
107	Сгуститель
108	Шнековый транспортер
109	Двухдисковая мельница
110	Массный бассейн
111	Насос
112,113,114,115	Дисковая мельница
116	Сгуститель
117	Массный бассейн
118	Насос
119	Массный бассейн
120	Массный бассейн
121	Насос
122	Насос
123	Скруббер «Вентури»
124	Бак охлаждающих вод от оборудования
125	Насос
126	Магнитный вариатор питателя
127	Механический фильтр
128	Насос
129	Расходный бак варочного раствора
130	Насос
131	Бак хранения варочного раствора
132	Бак оборотной воды
133	Насос
134	Барабанный сгуститель
135	Скребокый транспортер
136	Ванна-отстойник со шнеком
137	Бак горячей воды
138	Насос
139	Бак фильтрата
140,141, 142, 143, 144	Насосы
145	Бродильный чан
146	Дображиватель
147	Сепаратор
148	Сборник спиртовой бражки
149	Бражная колонна
150	Эпюрационная колонна
151	Ректификационная колонна
152	Метанольная колонна
153	Дефлегматор
154	Конденсатор
155	Дефлегматор
156	Конденсатор
157	Дефлегматор
158	Конденсатор

1	2
159	Дефлегматор
160	Конденсатор
161, 162	Теплообменники
163	Аэротенк
164	Вторичный отстойник
165	Физико-химическая очистка стоков
166	Насосная станция

Таким образом, предприятия целлюлозно-бумажной промышленности являются крупными потребителями теплоты при одновременно высоких ее потерях со сбросами в окружающую среду. Это, прежде всего, теплота отработанного влажного воздуха картоноделательной машины и теплота охлаждения технологических потоков на стадиях сушки бумаги и производства спирта. Данные потоки являются низкотемпературными, поэтому перспективно рассмотреть возможности использования трансформаторов теплоты для возврата теряемой тепловой энергии в производство. Кроме того, из описания технологии следует, что количество элементов в теплотехнологической схеме велико, что одновременно превращает технологическую цепочку в многоконтурную схему и вызывает неоднозначность параметров потоков схемы. Устранить такую неоднозначность позволит структурный метод в рамках системного анализа, рассматриваемый в Разделах 2 и 3.

## **РАЗДЕЛ 2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ**

### **2.1. Производство как сложная система**

Обязательным элементом при исследовании теплотехнологических процессов и теплотехнологических схем промышленных производств является их расчет. Однако исследуемые схемы имеют значительное количество обратных связей, «рециклов» материальных и тепловых потоков и прочих системных закономерностей. В связи с этим фактом расчет таких схем является сложным и требует специального подхода, поиску которого уделялось большое внимание [34, 35]. Таким подходом может быть так называемый «системный подход».

Системный подход может применяться как при проектировании, так и при исследовании теплотехнологических схем действующих производств. В таком случае задача исследования может быть поставлена как задача анализа существующей схемы или как задача ее оптимального выбора [35].

Для применения системного подхода в настоящее время развиваются три области системных исследований [36]:

- создание универсальных системных концепций – разработка общей теории систем;
- развитие системного подхода – разработка методологических подходов для исследования систем разного типа;
- развитие системного анализа – набора методологических приемов решения сложных задач (например, для сложноструктурированных, многоконтурных схем).

При этом для решения конкретных задач, например при проектировании производства, технологии, выделяют следующие этапы системного исследования.

1. Общий анализ существующего или проектируемого производства, формулировка цели исследования, определение иерархической структуры технологии.

Включает постановку задачи. Предполагает проведение предварительного общего анализа задачи, например, анализ возможных технологических схем осуществления процесса. В случае, если ставится задача оптимального выбора технологической схемы, последующие этапы должны рассматриваться применительно к каждому из предполагаемых вариантов технологической схемы.

Определяется цель, которой добиваются при проведении исследования и, если задача заключается в оптимизации системы, ее критерии.

При реализации данного этапа нужно учитывать место и связи данного производства с производствами, выступающими по отношению к нему в роли поставщиков или потребителей, а также во многих случаях с производствами, выпускающими аналогичную продукцию. Другими словами, это выделение уровней элементов исследуемого объекта и взаимосвязей между ними на основе фундаментальных знаний, экспериментальных данных и опыта. Здесь возможно рассмотрение вопросов введения частичных критериев оптимизации для отдельных блоков и подсистем блоков, их связи с общим критерием оптимизации и зависящие от них вопросы подоптимизации. Выявляется возможное качественное влияние управляемых переменных на критерий оптимизации [35].

2. Формализация знаний о рассматриваемом производстве, технологии и элементах исследуемого объекта, принятие упрощений, ограничений и, как следствие, получения математического описания.

Цель этого этапа – получение математической формулировки задачи; математическая трактовка всех имеющихся ограничений.

Здесь учитываются различные ограничения, например, производительность схемы может быть заданной величиной. Разные технологические ограничения накладываются также на «внутренние»



переменные схемы: на температуру внутри реакторов исходя из условий термостойкости катализатора, его химической активности и селективности; на концентрации смеси реагирующих веществ с учетом условий взрывобезопасности; на отношения потоков жидкой и газообразной фаз в абсорберах; на параметрическую чувствительность процесса исходя из условий его управляемости и др. Наконец, ограничения накладываются на конструктивные переменные: на диаметры аппаратов (учет требований на транспортировку оборудования); на длины трубок в реакторах (учет ГОСТов и нормалей на выпускаемые промышленностью изделия) и т. п.

Математическое описание процесса состоит из математического описания отдельных блоков.

3. Реализация математического описания с использованием средств вычислительной техники в виде комплекса прикладных программ [37].

Это выбор метода расчета процесса ввиду наличия в схеме обратных связей по потокам вещества и теплоты. Расчет процесса при этом требует разрыва обратных связей с итеративным подбором переменных, отвечающих разорванным связям. В частности, выбор метода оптимизации и осуществление оптимального расчета представляет собой математическую задачу нахождения максимума критерия с учетом ограничений. Сложность этого этапа обуславливается сложностью математических моделей отдельных блоков системы, сложностью структуры системы и числом переменных [38 – 40].

4. Идентификация математических моделей, то есть установление степени соответствия результатов, полученных на модели и на реальном объекте.

Таким образом, современное крупное промышленное предприятие представляет собой сложную функциональную систему, включающую несколько производств – подсистем. Под подсистемой подразумевается любой узел системы: установка, элемент системы или типовой технологический процесс. Все элементы связаны между собой технологическими потоками или коммуникациями.

Такой системе свойственны все характерные признаки больших или сложных систем, обуславливающие задачи анализа и синтеза и требующие разработки специальных методов и средств решения этих задач на основе применения вычислительной техники.

Разработка, проектирование и управление сложной системой возможно при использовании системного подхода к анализу и синтезу технологических, в частности, теплотехнологических схем производств.

Сложная теплотехнологическая схема, реализующая теплофизические процессы на предприятиях целлюлозно-бумажного производства, представляет собой совокупность блоков, объединенных связями, существующими между блоками, предназначенную для выполнения единой технологической цели в условиях внешних и внутренних возмущающих воздействий.

Под блоками сложной схемы (рис. 2.1) подразумеваются отдельные теплообменные аппараты: теплообменник, бумагоделательная машина, абсорбер, ректификационная колонна, компрессор, насос, емкость и пр.

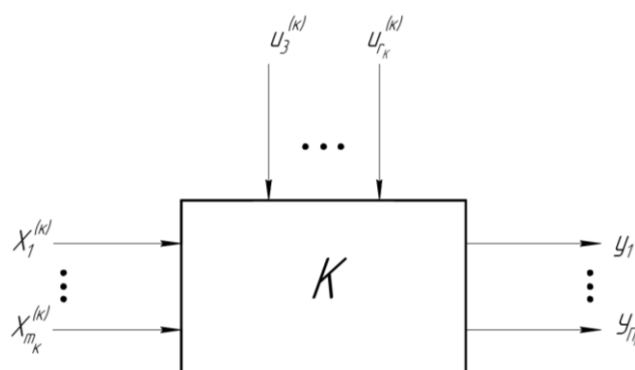


Рис. 2.1 Блок сложной схемы:  $k$  – номер блока;  $x^k = (x_1^k, \dots, x_i^k, \dots, x_{m^k})$  – входной поток  $k$ -го блока;  $y^k = (y_1^k, \dots, y_j^k, \dots, y_n^k)$  – выходной поток  $k$ -го блока;  $u^k = (u_1^k, \dots, u_l^k, \dots, u_r^k)$  – управление, возмущение  $k$ -го блока;  $i = 1, \dots, m$  – номер входного потока;  $j = 1, \dots, n$  – номер выходного потока;  $l = 1, \dots, r$  – номер управления, возмущения

В некоторых случаях блок может состоять из нескольких аппаратов или, например, если в качестве системы рассматривается сам аппарат, может

являться частью аппарата. Связи, объединяющие блоки – это материальные и энергетические потоки. Каждый поток на входе и выходе блоков характеризуется рядом параметров. К таким параметрам относятся расход, состав, температура, давление и ряд других физических характеристик. Обозначим такие входы и выходы как  $x_i^k$  и  $y_j^k$ . [41].

Блоки сложной схемы по функциональным и геометрическим характеристикам можно подразделить на: объединительные (рис. 2.2а), распределительные (рис. 2.2б), соединительные (рис. 2.2в), разделительные (рис. 2.2г) и блоки межфазного обмена (рис. 2.2д) [34].

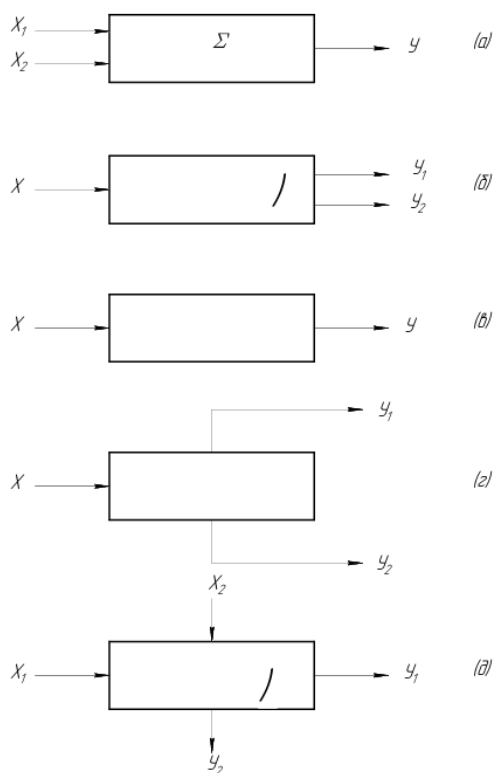


Рис. 2.2 Основные типы блоков сложных схем: а) объединительный блок; б) распределительный блок; в) соединительный блок; г) разделительный блок; д) блок межфазного обмена

Объединительный блок осуществляет суммирование входных потоков и имеет один поток на выходе.

Распределительный блок осуществляет распределение потоков и имеет один поток на входе. Упрощенно можно считать, что у объединительного два потока на входе, а у разделительного – два потока на выходе. Такое упрощение возможно, если считать блок с большим числом входов или выходов последовательностью блоков указанного типа. В распределительном блоке все параметры потоков на входе и выходе одинаковы за исключением расходов.

В аппаратах, представленных соединительными блоками, осуществляется химическое превращение исходных веществ в продукты реакции или изменение физических параметров потока. У таких блоков по одному потоку на входе и на выходе. Представителями блоков этого типа являются реакторы и компрессоры.

Разделительный блок отличается от распределительного блока тем, что осуществляет фазовое разделение потоков; имеет один поток на входе и два на выходе. Представителями блоков этого типа являются ректификационные колонны, сепараторы.

Блок межфазного обмена осуществляет тепло- или массообмен между потоками; у него по два потока на входе и выходе. Представителями блоков этого типа являются теплообменники и абсорберы.

В объединительных, соединительных, разделительных блоках и блоках межфазного обмена практически все параметры потоков могут быть различными [42].

Современные теплотехнологические схемы представляют собой единый комплекс разнородных элементов оборудования со сложной структурой технологических связей. В этом комплексе одновременно протекают и тесно взаимодействуют различные теплофизические, физико-химические процессы, совместно применяются различные виды и фазы энергоносителей, разнообразные материалы. В теплотехнологической схеме могут найти применение разнообразные типы конструкций и компоновок оборудования. Также теплотехнологические схемы предприятий характеризуются значительной сложностью внутренних взаимосвязей параметров, процессов и

характеристик схемы, а также внешних ее связей с другими объектами топливно-энергетического хозяйства и народного хозяйства страны.

Исходя из многообразия элементов оборудования теплотехнологических схем предприятий, числа параметров, характеризующих каждый элемент оборудования, числа возможных структурных соединений элементов оборудования в теплотехнологическую схему, очевидно, что число возможных вариантов выполнения теплоэнергетической установки почти беспредельно. Следовательно задача состоит в том, чтобы найти эти варианты, проверить их техническую выполнимость, экономически оценить каждый из них и, сравнивая между собой, выбрать наилучший.

При решении этой задачи выбора наиболее эффективного варианта возникают большие трудности. Многие характеристики теплотехнологических процессов и связей элементов оборудования, а также свойства их объединений известны лишь приближенно и имеется бесконечное число возможных вариантов структуры теплотехнологической схемы. Разным условиям соответствуют свои оптимальные варианты теплоэнергетической установки и поэтому дополнительно возникает задача выбора среди множества оптимальных вариантов наиболее обоснованного решения, которое только и можно рассматривать как оптимальный вариант теплоэнергетической установки.

В связи с вышесказанным при поиске конструктивных путей решения этих задач подтверждается актуальность использования методологию системного подхода к исследованию сложных и полностью не формализуемых систем [43]. Система состоит из множества связанных сложными связями и взаимодействующих элементов и представляет собой не простое суммирование, а особое их соединение, придающее всей системе в целом новые качества, отсутствующие у каждого из них. Как правило, исследуемая система представляет собой элемент системы более высокого порядка. Элементы исследуемой системы в свою очередь выступают как системы более низкого порядка. Исследуемая система является недетерминированной. Основная цель

системного подхода – раскрытие реального механизма функционирования рассматриваемой системы, а для управляемых систем – облегчить лучшую их адаптацию к изменяющимся внешним условиям.

Задачи оптимизации теплотехнологической схемы совпадают с целью системного подхода – выбрать наилучшие пути приспособления исследуемой системы к постоянно меняющимся и не вполне определенным внешним условиям. Тем самым подтверждаются принципиальная возможность и необходимость системного подхода к решению задачи оптимизации теплотехнологических схем.

## **2.2 Иерархия теплотребляющих установок**

Важной характеристикой системы является ее структура, представляющая внутреннюю организацию целостной системы и способ взаимосвязи, взаимодействия образующих ее компонентов.

При разработке оптимальной энергоэффективной технологии структура системы имеет большое значение, так как от взаимосвязи аппаратов зависит качество переработки сырья и расход энергии на производство продуктов. Благодаря структуре набор аппаратов, установок превращается в единое целое, в систему, где каждый элемент оказывается связанным с другими элементами. При этом параметры потоков в системе -могут быть выявлены только с учетом всех их связей в системе.

Таким образом, теплотехнологическая схема предприятия представляет собой целостную систему взаимосвязанных элементов (аппаратов, установок), обладающий определенной структурой, допускающий вычленение иерархии элементов, в том числе и комплексов. Взаимодействуя со средой, т. е. с другими частями производства, любая теплотехнологическая установка может рассматриваться как элемент высшей, более широкой системы (например, цех,

завод). В свою очередь эти системы могут быть подсистемами еще больших систем – комбинатов, компаний.

Следовательно, такие производства обладают многоэтапной иерархичностью.

В свою очередь каждое предприятие – производитель энергетической продукции является сложной системой, которая включает в себя большое количество единиц разнотипного энергетического оборудования, объединенных физико-техническими и транспортными связями [43].

Каждую такую сложную систему целесообразно представлять в виде ряда иерархически соподчиненных систем. Применительно к теплотехнологическим схемам выделяют ряд иерархических уровней. Это теплотехнологическая схема в целом, энергетические агрегаты, группы элементов оборудования, элементы оборудования.

Конечные элементы иерархической структуры теплотехнологической схемы – элементы оборудования можно подвергнуть дальнейшей детализации с целью изучения отдельных явлений, процессов, конструкций. Эти исследования производятся на нижестоящей ступени иерархии, т. е. на уровне физико-технических систем частей элементов оборудования. лишь для целей их оптимизации. Количество эквивалентных систем нижнего яруса иерархии может изменяться в достаточном диапазоне. Для достаточно сложных типов теплотехнологических схем на нижестоящей ступени целесообразно выделять и рассматривать до 50 – 70 элементов оборудования [43].

Следующие уровни иерархии образованы последовательным агрегированием каждого предыдущего уровня. На уровне групп элементов оборудования следует учитывать в обобщенном виде многочисленные конструктивные параметры и показатели, которые были весьма детально учтены на уровне рассмотрения отдельных элементов оборудования. На этом уровне основное внимание должно быть обращено на описание конструктивно-компоновочных, термодинамических и расходных параметров, а также показателей, характеризующих в целом группу элементов оборудования.

Обычно на данном уровне целесообразно выделение до 7 – 10 групп элементов оборудования, образующих достаточно самостоятельные системы (например, система регенеративного подогрева питательной воды паротурбинной установки, система топливоподготовки и топливоподачи). Эквивалентные группы элементов оборудования на следующем иерархическом уровне можно объединить в агрегаты. В качестве агрегатов целесообразно рассматривать такие крупные системы, как, например, котельная установка, турбоустановка, система питательных насосов. На этом уровне для получения эквивалентного описания агрегатов осуществляется дальнейшее обобщение описания многочисленных элементов оборудования и связей между ними. На верхнем уровне – уровне эквивалентного описания энергоустановки дается наиболее обобщенное описание основных связей, процессов и показателей, характеризующих рассматриваемую установку [43].

### **2.3 Общие положения системного подхода**

Рассмотрим основные этапы исследования проблемы оптимизации теплотехнологических схем [35].

1. Выделение исследуемой системы теплоэнергетической установки (например, электростанции) из более общей системы топливно-энергетического хозяйства страны. На этом этапе должны быть четко очерчены границы исследуемой системы и посредством анализа объективных целей ее сооружения и функционирования сформулирована в общем виде задача оптимизации теплотехнологической схемы, а также соответствующие ей конкретные критерии оптимальности.

2. Выяснение внутренней структуры исследуемой системы, состава ее элементов и видов связей между ними. Цель этого этапа – достижение возможно более отчетливого представления о внутренней структуре и



свойствах объекта исследования, т. е. построение иерархии систем теплоэнергетической установки.

3. Агрегирование реальных элементов и связей системы, позволяющее построить иерархию эквивалентных систем, каждый последующий уровень которой описывает отдельные части исследуемой системы и ее в целом во все более и более агрегированном виде. Результатом этого этапа работы можно считать создание иерархии таких эквивалентных систем, каждая из которых охватывает наиболее тесно связанные элементы исходной системы и вместе с тем по своим размерам доступна для исследования.

4. Формулировка состава задач, решаемых применительно к каждой эквивалентной системе на разных временных уровнях. Целью этого этапа является распределение по уровням иерархии всего многообразия конкретных задач, которые необходимо решить в процессе оптимизации теплотехнологической схемы.

5. Выявление состава и способов взаимосвязи эквивалентных систем в рамках сконструированной иерархии. Поскольку сами системы, если их рассматривать во временном разрезе, являются информационным эквивалентом реальной теплотехнологической схемы или отдельных ее частей, связи между ними приобретают форму информационных связей, описывающих с той или иной степенью приближения элементы и технологические связи установки. Следовательно, задача этого этапа состоит в формировании иерархии технико-экономической информации, т. е. в определении состава тех показателей, которые необходимы для оптимизации каждой системы и которыми она должна обмениваться с остальными системами и внешней средой.

6. Построение комплекса моделей, который, собственно, и служит инструментом решения задач оптимизации каждой системы и теплоэнергетической установки в целом. Действительно, только на моделях можно практически выполнить многогранное исследование поведения каждой подсистемы и системы в целом и реализовать сложный, как правило,

итеративный процесс, который необходим для взаимоувязки (с допустимой погрешностью) частных решений всех систем иерархии.

Перечисленные этапы системного подхода, в сущности, преодолевают первую отмеченную выше трудность проблемы оптимизации теплотехнологических схем предприятий нефтехимического синтеза – их колоссальную размерность. Для этого, во-первых, исследуемая сложная проблема интерпретируется как иерархическая система, которой соответствует еще более сложная иерархия решаемых задач. Это позволяет во много раз уменьшить размерность каждой системы, сделать ее обозримой, а относящиеся к ней задачи – разрешимыми. Разумеется, такое членение задач достигается ценой сложной последующей взаимоувязки частных решений. Однако проблема при этом перестает быть принципиально неразрешимой и сводится к продолжительности расчета, т. е. в итоге к эффективности вычислительных средств. Во-вторых, полный перебор возможных вариантов исследуемой системы заменяется упорядоченным (направленным) перебором несравненно меньшего количества вариантов, каждый из которых формируется путем сравнительно небольших преобразований предыдущего варианта и превосходит его по принятому критерию оптимальности. Это становится возможным при использовании для оптимизации систем метода моделирования.

В настоящее время для оптимизации разрабатываемых и проектируемых теплотехнологических схем применяются математические модели, описывающие их свойства, элементы и связи в виде некоторой системы уравнений, переменных и логических условий. Эти модели реализуются на ЭВМ. В сочетании с использованием различного рода методов математического программирования для поиска экстремальных решений они обеспечивают упорядоченный (направленный к цели) поиск оптимального решения, тем самым уменьшая количество рассматриваемых вариантов проектируемой теплотехнологической схемы.

Рассмотрим выделение теплоэнергетической установки из системы топливно-энергетического хозяйства страны. Современные

теплоэнергетические установки (электростанции), объединенные в генерирующий сектор энергетики, в совокупности представляют собой важнейший узел переплетения топливно-энергетического, материально-ресурсного, трудового и финансового балансов страны. В свою очередь, сами они являются достаточно сложными многопараметрическими и многосвязными системами, взаимодействующими с электроэнергетическими системами, потребителями, обслуживаемыми отраслями и с окружающей средой. Системный подход к исследованию теплотехнологических схем требует прежде всего обоснованного выделения этой группы систем из более общих систем топливно-энергетического хозяйства и народного хозяйства страны в целом и рассмотрения этих систем как самостоятельных объектов изучения и оптимизации. При таком выделении и решении собственно задачи оптимизации параметров и профиля оборудования теплотехнологических схем должен быть организован обмен информацией с внешними более общими и смежными системами. По отношению к этим системам теплоэнергетические установки выступают в двойном качестве – как потребитель продукции указанных систем (капиталовложения, трудовые и природные ресурсы и т. д.) и как поставщик электрической и тепловой энергии. Этому соответствуют две категории внешних связей теплотехнологических схем, одни из которых можно назвать прямыми, а другие – обратными.

К числу основных прямых внешних связей, определяющих условия оптимизации теплотехнологических схем, относятся: технологические и экономические связи с общеэнергетической системой, с локальными системами, характеризующими район сооружения и будущей эксплуатации теплоэнергетической установки (электростанции), а также технико-экономические связи с системой народного хозяйства страны.

Связи с общеэнергетической системой в свою очередь можно подразделить на электрические связи с электроэнергетической системой, связи с топливоснабжающей системой, связи с системой теплоснабжения и т. д.

Важно отметить, что каждый из указанных показателей, характеризующих внешние связи, влияет, по существу, на все элементы оборудования и технологические связи схемы, хотя непосредственно многие из них оказывают свое действие только на один или несколько элементов оборудования. Здесь проявляется тесная внутренняя взаимосвязь отдельных элементов оборудования теплотехнологической схемы, которая и передает «неявное» влияние внешних факторов на всю схему. Например, температура наружного воздуха непосредственно влияет в газотурбинных или парогазовых установках только на работу компрессоров. Однако изменение потребляемой компрессором мощности при изменении температуры наружного воздуха приводит к нарушению энергетического баланса установки, восстановление которого потребует изменения расходов рабочих тел, осуществляющих связь между элементами оборудования [43]. В результате происходит изменение значений всех термодинамических и расходных параметров установки. Аналогичные «неявные» пути влияния на все элементы оборудования любой теплоэнергетической установки можно проследить и для других показателей внешних связей. Из приведенного видно сложность полного воздействия на установку всей совокупности внешних связей; это воздействие может быть отражено лишь на математической модели теплотехнологической схемы, включающей все основные элементы оборудования и внешние связи.

Кроме внешних информационных связей для теплотехнологических схем характерно наличие внутренних прямых и обратных связей.

Исходная внутренняя информация включает систематизированное аналитическое, табличное или алгоритмическое описание:

- 1) закономерностей и характеристик протекания технологических процессов (изменение внутреннего относительного к.п.д. турбомашин, характеристик термодинамических процессов и т. д.);
- 2) термодинамических и теплофизических свойств рабочих тел и теплоносителей;

3) характеристик разнотипных конструкций оборудования, а также условий и ограничений, накладываемых на параметры и характеристики конструкций.

В исходную информацию включаются также перечень конструктивно-компоновочных типов для элементов оборудования теплотехнологической схемы и перечень вариантов вида ее технологической схемы (или условий их формирования).

Подобно показателям внешних связей, каждый из показателей внутренних связей оказывает влияние на все элементы оборудования теплотехнологической схемы. Так, изменение показателя технологического процесса в каком-либо элементе оборудования непосредственно отразится только на показателях этого элемента, но одновременно изменятся значения термодинамических и расходных параметров на входе или выходе из этого элемента оборудования, что приведет к изменению балансовых соотношений в других элементах, связанных с этим, и т. д. В итоге возможно изменение всех термодинамических и расходных параметров схемы. Таким образом, при изменении любого показателя внутренних связей необходимо учитывать не только явные, видимые изменения в соответствующем элементе оборудования, но также и вторичные, неявные изменения по всей схеме. Последние по своему эффекту могут быть не только сопоставимыми с непосредственными изменениями показателей данного элемента оборудования, но и значительно превышать их, поскольку они охватывают большое число элементов оборудования установки.

Обратная связь по внутренней информации определяет направления дальнейшего развития и совершенствования исследований, проводимых на нижестоящей ступени иерархической лестницы, т. е. на уровне физико-технических систем отдельных явлений, процессов, конструкций.

В наиболее полной постановке задача комплексной оптимизации теплотехнологической схемы включает оптимизацию термодинамических,

расходных, конструктивных и компоновочных параметров, а также вида теплотехнологической схемы при учете внешних и внутренних связей.

Наконец, имеется система балансовых уравнений для всех элементов схемы, которая связывает между собой термодинамические и расходные параметры, а также технологические характеристики процессов.

Каждая из этих постановок имеет свои преимущества и недостатки. Однако первая из них, по-видимому, предпочтительна для решения рассматриваемого класса задач, если учесть большую условность фиксирования на длительный период цен на продукцию данной системы. Поэтому для оптимизации теплотехнологических схем, имеющих длительный период функционирования, целесообразна первая постановка задачи оптимизации: определение такого сочетания термодинамических, расходных, конструктивных, компоновочных параметров и вида технологической схемы, при котором заданные объемы отпускаемой электрической и тепловой энергии обеспечиваются с минимальными народнохозяйственными затратами при выполнении всех внешних и внутренних ограничительных условий ее сооружения и функционирования.

В случае сравнения вариантов теплотехнологической схемы с разными объемами продукции приведенные затраты по ним должны быть скорректированы до сопоставимых объемов производства. Это требование означает необходимость приведения всех рассматриваемых вариантов к одинаковому энергетическому эффекту [43].

В задачи системного анализа входят:

- разработка формализованных моделей, описывающих структуру, функции и свойства систем;
- характеристика иерархического строения систем и взаимосвязей объектов различных уровней;
- определение общих свойств системы, исходя из свойств составляющих ее подсистем;

– определение интегральной функции системы на основе функций отдельных элементов.

Определение материальных и энергетических потоков, обладающих определенными свойствами и параметрами, а также параметров работы отдельных аппаратов позволяет оценить как характеристику, так и структуру любой подсистемы технологического объекта. При этом имеется в виду, что рассматриваемый объект предназначен для выполнения определенной функции, т. е. осуществления каких-либо технологических операций, результатом которых является выход продукта или полупродукта. Все это должно учитываться при разработке новой технологии.

Таким образом, разработку технологии производства осуществляют по следующим этапам:

1. согласование и распределение материальных и энергетических потоков, определение общей нагрузки на аппараты;
2. выбор и расчет технологического оборудования;
3. определение затрат на все производство и рассмотрение различных вариантов теплотехнологических схем;
4. окончательный выбор теплотехнологической схемы нефтехимического производства.

Выполнение первого этапа возможно только после изучения химических превращений, физико-химических свойств различных смесей, образующихся на разных этапах, и выявления всех ограничений.

При рассмотрении любого производства, любой теплотехнологической схемы как сложной системы предварительно необходимо изучить связи между элементами (аппаратами), выявить совокупность управляемых и неуправляемых параметров, способных влиять на показатели разрабатываемого процесса. К ним обычно относят составы потоков, их расходы и температуры, температуру и давление в аппаратах, количество подводимой и отводимой теплоты, параметры теплоносителя и хладагента и т. д., т. е. те, от которых прежде всего зависит протекание химического превращения сырья, чистота и

полнота выделяемых компонентов, энергетические и капитальные затраты на производство продуктов.

Другими словами, синтез теплотехнологической схемы – это операция выбора типов элементов и структуры технологических связей между ними, определения параметров элементов и технологических потоков системы, которые в конечном счете обеспечивают оптимальное значение критерия эффективности.

Анализ теплотехнологической схемы – это операция изучения свойств и эффективности функционирования системы в зависимости от структуры технологических связей между подсистемами и элементами, от значений технологических и конструкционных параметров, технологических режимов.

При синтезе теплотехнологической схемы могут решаться следующие задачи технологии:

1. определить оптимальный маршрут синтеза целевых продуктов из различных исходных веществ, используя известные типы реакции;

2. при заданном химическом маршруте синтеза целевых продуктов из исходных веществ определить топологию теплотехнологической схемы (выявить технологическую схему), выбрать параметры элементов и потоков, которые будут обеспечивать функционирование системы при оптимальном значении критерия эффективности;

3. при заданных типах и свойствах элементов теплотехнологической схемы, обеспечивающих осуществление различных технологических процессов, выбрать элементы и определить структуру технологических связей химико-технологической схемы, при которой будет достигаться оптимальный показатель эффективности;

4. при заданных типах разделительных элементов необходимо определить технологическую схему разделения, параметры элементов и параметры технологических потоков.

При разработке технологии производства продуктов и проектировании отдельных цехов или их усовершенствовании, а также при определении



оптимальных режимов работы отдельных аппаратов и правильной их взаимосвязи в теплотехнологической схеме задачи анализа этих систем интерпретируются как оценка возможных вариантов отдельных комплексов или схемы в целом (выбор структуры схемы, значений параметров и т.д.). Именно сопоставляя различные характеристики, можно получить первое представление о преимуществах и недостатках различных вариантов теплотехнологических схем.

Так, применение нескольких разделительных комплексов, основанных на различных методах разделения, позволяет снять ограничения, обусловленные физико-химическими свойствами или технологическими возможностями, и приводит к нескольким вариантам теплотехнологических схем. Эти теплотехнологические схемы отличаются типом, числом и последовательностью соединения аппаратов, а следовательно, разными энергетическими и капитальными затратами, но приводят к выделению продуктов одинакового качества. В связи с этим, возникает сложная многовариантная задача разработки, проектирования и выбора наиболее рационального варианта теплотехнологической схемы. В частности, при разработке и исследовании различных вариантов технологических схем разделения необходимо прежде всего определить допустимые пределы изменения входных и выходных переменных, т. е. выделить соответствующие ограничения для подсистем и всей системы [44]. Итак, теплотехнологические промышленные схемы обладают достаточно сложной топологической структурой, имеют значительное количество разветвлений, обратных связей и т. д. Однако можно выделить ряд типовых сложных схем, которые наиболее часто встречаются на практике. Это схемы с последовательным соединением блоков, схемы с последовательным соединением блоков с байпасированием, схемы с параллельным соединением блоков, схемы с рециклом, а также комбинация схем указанного типа. В качестве примеров схем с последовательным соединением блоков (рис. 2.3) можно привести схемы, включающие, например, многоступенчатый реактор с промежуточными

теплообменниками, бумагоделательную машину, многоступенчатый компрессор.

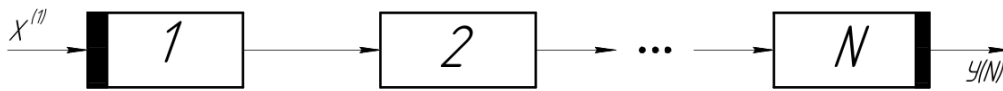


Рис. 2.3 Последовательное соединение блоков

Пример схемы с последовательным соединением блоков с байпасированием (рис. 2.4) – последовательность адиабатических реакторов с байпасированием потока питания.

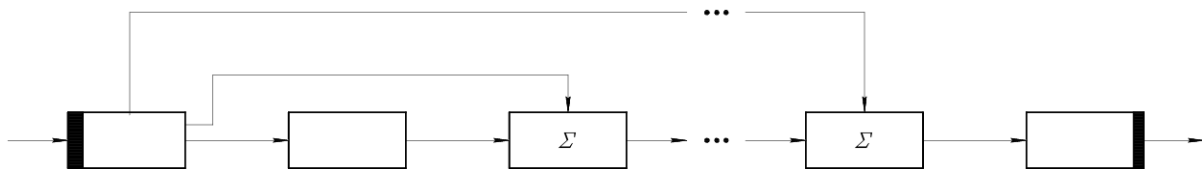


Рис. 2.4 Последовательное соединение блоков с байпасированием

Рассмотрим схемы с параллельным соединением блоков (рис. 2.5). Здесь имеет место распределение потоков между параллельно работающими блоками. Под блоками подразумеваются аппараты, которые могут отличаться друг от друга рядом характеристик.

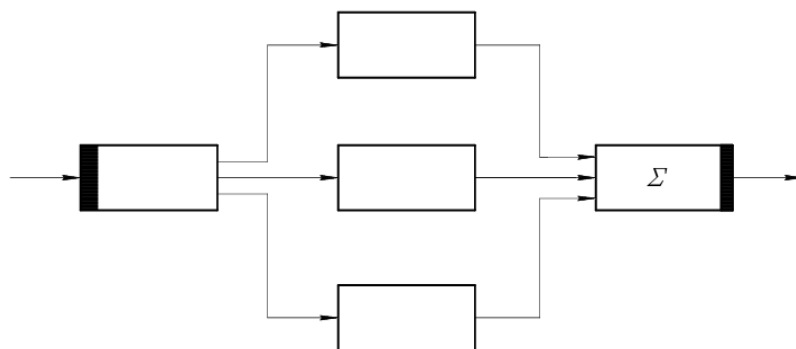


Рис. 2.5 Параллельное соединение блоков

Схемой с рециклом (рис. 2.6) является последовательность реакторов с абсорбером, где происходит выделение целевого продукта, получаемого в реакторах, в том случае, когда в реакторе не удастся осуществить полное превращение исходного вещества.

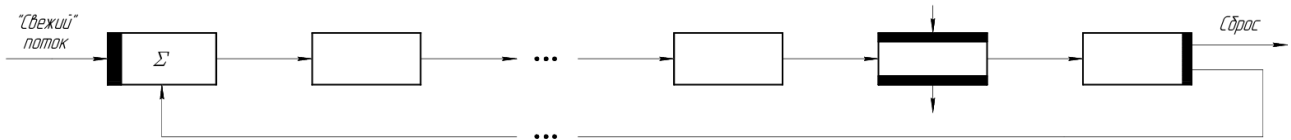


Рис. 2.6 Последовательность блоков с рециклом

Часто исследуемая сложная теплотехнологическая схема представляет собой комбинацию типовых схем, например, последовательно-параллельная схема (рис. 2.7) или схема с двумя рециклами (рис. 2.8).

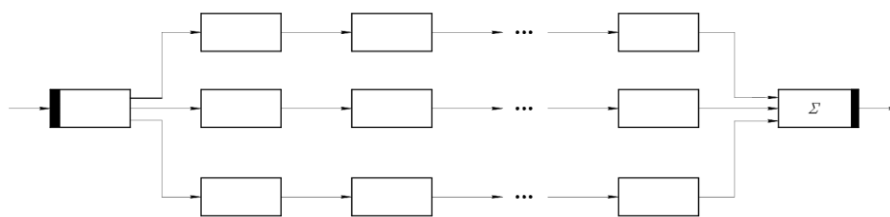


Рис. 2.7 Параллельно-последовательное соединение блоков

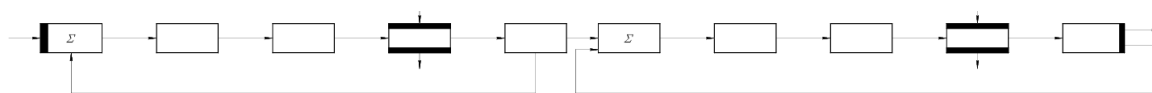


Рис. 2.8 Последовательность блоков с двумя рециклами

Реальные теплотехнологические схемы производств нефтехимического синтеза имеют более сложную топологическую структуру в отличие от рассмотренных схем и могут быть представлены в виде их сложной комбинации [2.12].

Оптимальный режим теплотехнологической схемы можно было бы легко определить после нахождения оптимальных режимов отдельных аппаратов в том случае, если схема состояла бы из несвязанных друг с другом блоков; однако наличие между ними связей и несогласованность входных и выходных

переменных при попытке найти оптимальный режим для каждого аппарата не позволяет использовать такой подход. Следует использовать такой метод оптимизации сложной схемы, который позволил бы решить задачу согласования оптимальных режимов отдельных аппаратов. Во-первых, необходимо определить оптимальные режимы отдельных аппаратов схемы, во-вторых – согласовать их входные и выходные переменные.

Исследование сложной теплотехнологической схемы является сложной задачей в связи с тем, что:

1. сложная теплотехнологическая схема включает в себя большое количество блоков или аппаратов, описываемых рядом уравнений; в связи с этим расчет всей схемы значительно трудоемок;

2. наличие рециклов, контуров в схеме приводит к необходимости проведения итерационных процедур;

3. количество варьируемых параметров  $M$  велико. При этом для подсчета всех частных производных критерия по этим параметрам необходимо  $M+1$  раз рассчитать схему;

4. поиск оптимального режима усложняется значительным количеством ограничений на переменные в различных аппаратах.

В связи с этим необходимы более эффективные методы определения оптимальных режимов схем. Основные характеристики, позволяющие с разных позиций оценивать методы оптимизации, следующие:

– быстроедействие метода. Так, решение задачи методом перебора всех возможных комбинаций варьируемых параметров требует значительных затрат времени. Следует искать более эффективные методы оптимизации, обеспечивающие решение задач в приемлемые сроки;

– достаточный объем памяти для реализации данного метода на вычислительной машине;

– алгоритмичность метода, возможность использования метода без существенных изменений для определенного типа задач при минимальном вмешательстве человека в процесс решения задачи на машине;

– трудоемкость применения метода, сложность операций, которые необходимо выполнить перед программированием.

Выбор оптимального варианта производится по критерию оптимизации.

Первым этапом при поиске наилучшего, наивыгоднейшего решения той или иной задачи является выбор критерия оптимизации, определение того, что следует вкладывать в понятие «наивыгоднейшее» [34].

Одним из оптимальных решений при разработке, проектировании новых и усовершенствовании действующих производств, при управлении ими является решение, обеспечивающее наибольшую экономическую эффективность производства.

Наилучший вариант такого решения выбирается на основе следующих критериев оптимизации:

1. количество производимой продукции  $V$ , т/год. Для сложных производств с  $n$  видами продукции этот показатель эффективности характеризуется совокупностью параметров  $\{V_j\}$ , где  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

2. качество продукции, оценивающееся совокупностью  $p$  физико-химических параметров, например, содержанием примесей, мутностью раствора,  $\{f_j\}$ , где  $j = 1, 2, \dots, p$ ;

3. эксплуатационные затраты  $Z_э$ , руб/год;

4. капитальные затраты  $K$ , руб. [38].

Неопределенность ряда параметров потоков теплотехнологических схем определяется, как выявилось выше, наличием замкнутых последовательностей элементов. С разомкнутыми же участками схем все проще. В сложных схемах одна из задач, помимо нахождения сложных многоконтурных участков схем, состоит в выявлении разомкнутых участков и проведении последовательного безитерационного расчета элементов, составляющих данный участок [7].

Можно выделить следующие типы разомкнутых схем – схемы, представляющие собой последовательность блоков (линейный участок), схемы с объединительным звеном, схемы с разъединительным звеном, схемы с байпасом.

Линейный участок (рис. 2.9) представляет собой не содержащую разветвлений последовательность блоков (k, m), в которой ни один из блоков не встречается дважды. Другими словами, это путь в графе, от вершины k до вершины m, не содержащий ни одной вершины, проходимой дважды.

Для расчета линейного участка необходимо знать входные переменные k-го блока; это позволяет рассчитать выходные параметры блока k и всех последующих блоков (k+1, ..., m).

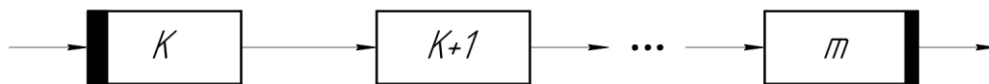


Рис. 2.9 Последовательность блоков

Для расчета схемы с объединительным звеном (рис. 2.10) следует изначально рассчитать линейные участки (1, k-1) и (1, N), тогда можно узнать значения входных переменных s-го звена, являющегося объединительным. После этого можно рассчитать линейный участок (k, M).

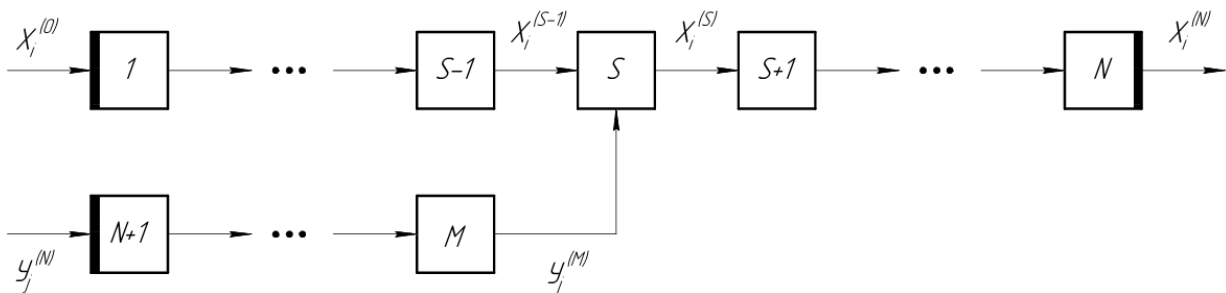


Рис. 2.10 Схема с объединительным звеном

Для расчета схемы с разъединительным звеном (рис. 2.11) необходимо рассчитать линейный участок (1, k), что дает возможность рассчитать линейные участки (1, N) и (k+1, M).

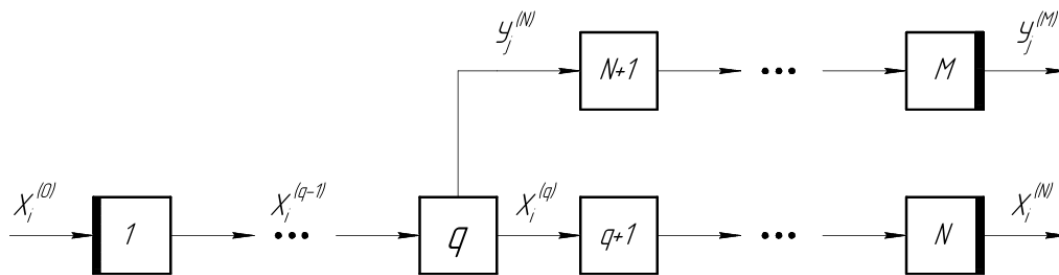


Рис. 2.11 Схема с разъединительным звеном

Общий вид схемы с байпасом представлен на рисунке 2.12. Для ее расчета вначале рассчитывается линейный участок (1, k), затем участки (k+1, s-1) и (1, N) и, наконец, линейный участок (s, M).

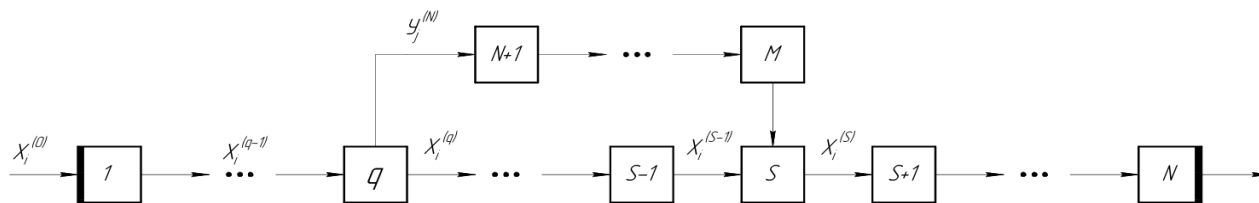


Рис. 2.12 Схема с байпасом

Таким образом, расчет разомкнутых схем, рассмотренных выше, достаточно прост. В каждом конкретном случае разомкнутой схемы следует построить алгоритм расчета аналогично приведенной выше методике. Следовательно, расчет любой разомкнутой схемы возможен без итераций и приближений. Расчет же замкнутых схем рассмотрим в следующей главе.

## 2.4 Методика проведения анализа структуры теплотехнологических схем с обратными связями

Теплотехнологическую схему любого промышленного предприятия можно рассматривать как совокупность объектов, элементов или технологических узлов, в каждом из которых осуществляется типовой технологический процесс или несколько процессов. Под объектами (элементами, технологическими узлами) подразумеваются аппараты схемы, а также комплексы аппаратов, производственные участки, заводы.

Технологические узлы или объекты находятся под влиянием ряда факторов. Любой объект имеет свою технологическую структуру, заданные параметры объекта, а также входные и выходные переменные (рис. 2.13).

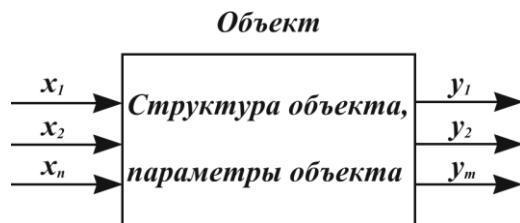


Рис. 2.13 Схема объекта:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные переменные;  
 $y_1, y_2, \dots, y_m$  – выходные переменные

Структура объекта или топология представляет собой форму организации системы, состав элементов объекта, особенности взаимосвязей между ними.

Под параметрами объекта подразумеваются величины, характеризующие условия протекания процессов в объекте, особенности аппаратного оформления. Это геометрические характеристики, физико-химические величины, характеризующие свойства протекающих процессов.

Входные переменные ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) – это совокупность параметров входных потоков объекта, параметры, характеризующие влияние окружающей среды на объект.

Выходные переменные ( $y_1, y_2, \dots, y_m$ ) – это совокупность параметров выходных потоков объекта. Сюда входят параметры состояния потока – массовый расход, объемный расход, концентрации компонентов, давление, температура, количество теплоты и пр., параметры свойств потока – теплоемкость, плотность, вязкость и пр. [38].

В качестве узлов (объектов) принимаются отдельные аппараты (теплообменные аппараты, реакторы и т. д.), а также их элементы, последовательности аппаратов, комплексы аппаратов (двухколонные установки, реакционно-ректификационные установки, абсорбер-десорбер) и ряд других.



Каждый элемент теплотехнологической схемы преобразует качественно или количественно параметры входных потоков данного элемента в параметры выходных потоков. Можно выделить основные элементы схемы, в которых происходит преобразование энергии и вещества (аппараты смешения, межфазного массообмена, механического разделения, селективного разделения), и вспомогательные элементы (рекуперативного теплообмена, нагрева, охлаждения, сжатия, расширения, изменения агрегатного состояния) [38].

Объекты схемы объединены связями – технологическими и энергетическими потоками. Поток, направляемый в объект, является его входом, выходящий – выходом. Потоки можно подразделить на внешние и внутренние. Внешние потоки объекта не связывают его ни с одним другим объектом схемы, они могут характеризовать связи данной схемы с другими внешними производствами или являться сбросными потоками. Внутренние потоки являются связующими по отношению к элементам схемы. То есть одна и та же связь является входом одного узла и выходом другого. Все производство рассматривается как последовательное описание операций, протекающих при определенных условиях в соответствующих аппаратах. Теплотехнологическая схема химико-технологической системы дает полную информацию об аппаратах, потоках, отображает процессы массо- и энергообмена.

Таким образом, объекты (технологические узлы) промышленных теплотехнологических схем различаются по сложности, типам включенных аппаратов, физической природе протекающих процессов. Объекты могут состоять из некоторого количества взаимосвязанных элементов. Для проведения анализа структуры такого объекта его следует разделить на отдельные звенья. Степень детализации при создании структурной схемы комплекса зависит от его сложности. Так, одно технологическое звено может соответствовать не одному аппарату, а группе (или комплексу) аппаратов.

Связь между объектами или технологическими узлами теплотехнологических схем соответствует технологическому (материальному) или энергетическому потоку. Данная связь характеризует ряд параметров потока (температуру, давление, расход вещества, состав и т.д.).

Для анализа отдельных элементов, комплексов элементов любая химико-технологическая система может быть представлена различными моделями или схемами. Вид схемы определяется видом элементов, характером связей между элементами. Так, топология системы может быть отражена в виде технологических, структурных, функциональных схем [38].

На технологической схеме элементы системы изображены в виде стандартного графического изображения, связи – в виде направленных линий. Технологическая схема позволяет подчеркнуть функциональное действие аппаратов или узлов схемы.

На структурной схеме элементы представлены в виде типовых блоков, каждый из которых может иметь несколько входов и выходов. Такая схема позволяет выявить взаимосвязи между элементами схемы и оценить сложную структуру в целом. Одним из вариантов структурной схемы является информационная схема (ИС), которая будет представлена ниже.

Операторная схема дает представление о физико-химических процессах, протекающих в элементах системы. Здесь элемент может быть изображен в виде совокупности нескольких типовых элементов.

Функциональная схема является блочной схемой, на которой каждый блок представляет собой подсистему, являющуюся стадией производства или отображающую какую-либо основную технологическую операцию.

В связи со сложностью, многоэлементностью теплотехнологических схем нефтехимических предприятий задачи их анализа, синтеза и оптимизации чрезвычайно сложны, требуют создания развитой информационной базы, привлечения мощных вычислительных средств. Для анализа сложноструктурированных теплотехнологических схем применяются методы математического моделирования [45].

Математическая модель многоэлементной теплотехнологической схемы представляет собой систему балансовых уравнений для каждого элемента схемы, отображающих взаимосвязи между параметрами технологических процессов. Система балансовых уравнений может включать в себя материальный, энергетический, эксергетический, гидравлический, аэродинамический и другие балансы. Параметрами системы являются расходные и термодинамические параметры.

Расчет сложной теплотехнологической схемы может быть совмещен с расчетом элементов схемы для уточнения теплового баланса, теплового и прочностного расчетов элементов оборудования, расчетов гидравлических и аэродинамических потерь в элементах, уточнения к.п.д. основных и вспомогательных агрегатов, расходов энергоносителей и термодинамических параметров. Такое уточнение значительно усложняет расчет схемы и требует многократного повторения расчета элементов и схемы в целом. От таких расчетов зависит точность определения показателей отдельных элементов схемы. Кроме того, изменение вида схемы, конструктивных решений, замена старого оборудования на новое, изменение параметров, протекающих в элементах схемы процессов, приводит к изменению структуры системы балансовых уравнений. В случае многокомпонентных теплотехнологических схем, включающих в себя значительное количество элементов, а также связей между элементами схемы (технологических и энергетических потоков) расчет значительно усложняется. Необходим универсальный алгоритм расчета для любого типа конструкций установки, вида схемы и степени ее сложности. Этот алгоритм должен быть построен на основании поэлементного расчета системы уравнений с учетом наличия замкнутых последовательностей элементов в схеме. Алгоритм должен учитывать то, что вместе с изменением вида схемы и компоновочных решений могут меняться функциональные связи между системами уравнений элементов. Такая методика расчета должна позволять вводить в схему или исключать из нее отдельные элементы или группы элементов, менять их связи и т. д.

Для решения системы нелинейных балансовых уравнений используется ряд методов. Для расчета сложных нелинейных систем уравнений наибольшее распространение получили численные итерационные методы: Ньютона, простых итераций, Зейделя, градиентный [34, 38].

Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений, используемые при анализе химико-технологических систем, можно разделить на три класса: 1) метод простой итерации и его модификации, а также методы, ускоряющие сходимость простой итерации; 2) метод Вольфа и его модификации, в частности, метод Ньютона; 3) квазиньютоновские методы (метод Бройдена или квазиньютоновский метод первого рода, метод с памятью) [38].

Одним из наиболее эффективных итерационных методов решения систем нелинейных уравнений считается метод Ньютона. В методе Ньютона ошибка каждого последующего приближения относительно действительного решения системы уравнений уменьшается пропорционально квадрату ошибки предыдущего приближения, т.е. метод Ньютона сходится квадратично. Однако применение метода Ньютона сопряжено с некоторыми вычислительными трудностями. Во-первых, на каждом шаге итерации нужно решать систему нелинейных алгебраических уравнений. Во-вторых, использование метода Ньютона связано с операциями обращения и умножения матрицы частных производных, требующими большого объема дополнительных вычислений. То есть на каждом шаге нужно определять не только значения функции, но также и элементов матрицы. Размеры этой матрицы возрастают пропорционально квадрату порядка системы уравнений. Система же балансовых уравнений для современных сложных теплотехнологических схем химико-технологических систем может состоять из нескольких тысяч уравнений. Формирование матрицы частных производных сопровождается также значительными трудностями, связанными со значительным количеством типов аппаратов, образующих теплотехнологическую схему. Для каждого из них необходимо разрабатывать свою систему уравнений для расчета частных производных.

Некоторое снижение трудоемкости метода можно получить при использовании на последующих итерациях матрицы частных производных, полученной на первой итерации, т.е. так называемого модифицированного метода Ньютона-Рафсона [35]. Метод Ньютона-Рафсона приводит к снижению времени вычисления на одной итерации, но замедляет сходимость вычислительного процесса в целом, увеличивается число итерации. Это обстоятельство особенно важно для рассматриваемой задачи. Методы Ньютона и Ньютона-Рафсона требуют хорошего исходного приближения, что не всегда выполнимо при расчете установок новых типов.

Метод Вольфа сходится примерно с такой же скоростью, как и метод Ньютона, однако требует значительного количества вычислений. Метод Вольфа выгодно отличается от метода Ньютона тем, что не требует вычисления матрицы [38].

Вычислительная схема решения системы уравнений методом простых итераций сводится к повторению последовательного расчета большого числа уравнений. При использовании данного метода значения переменных на каждом последующем шаге итераций определяются только значениями переменных на предыдущем шаге. По сравнению с методами Ньютона и Ньютона-Рафсона сходимость этого метода менее жестко обусловлена исходным приближением [35].

Метод Зейделя представляет собой усовершенствованный вариант метода простых итераций и при этом обладает всеми его преимуществами. Отличие его вычислительной схемы заключается в том, что результаты расчета каждого предшествующего уравнения используются при расчете последующих уравнений системы непосредственно на той же, а не на следующей итерации. В связи с этим скорость сходимости метода Зейделя выше, чем метода простых итераций. Это делает его в данном случае целесообразным для применения. Кроме того, метод Зейделя позволяет использовать структурную особенность системы уравнений, отражающую условно-непрерывный характер термодинамического цикла, для снижения числа первоначально задаваемых

параметров. Для любой реальной схемы теплоэнергетической установки можно найти такую последовательную расчетную «цепочку» элементов или подсистем уравнений аппаратов схемы, что все зависимые параметры каждого из последующих элементов определяются в процессе расчета в явном виде через зависимые параметры уже рассчитанных соседних элементов, известные значения независимых параметров установки. В целом получается, что любой зависимый параметр определяется как сложная неявная функция от всей совокупности параметров установки [35].

Данный метод построения и решения системы нелинейных балансовых уравнений для сложной теплотехнологической схемы химико-технологической системы основан на использовании метода декомпозиции всей системы уравнений. В результате проведения декомпозиции выявляются совокупности строго соподчиненных подсистем уравнений.

Метод позволяет рассчитывать сложные теплотехнологические схемы, включающие в себя значительное количество разнотипных аппаратов. Алгоритм этого метода универсален по отношению к числу элементов, характеру связей между ними при любом наборе типов аппаратов, типов систем уравнений. Данный метод компактен, точен. Может быть использован при внесении каких-либо изменений в схему, так как учитывает изменение рабочего набора систем уравнений, кодировки связей и последовательности расчета.

Рассмотренные выше методы решения систем уравнений используют только предыдущую итерацию для построения следующей итерации. Однако могут быть применены методы с «памятью», в которых для построения следующей итерации используются результаты предыдущих итераций. У таких методов скорость сходимости итерационного процесса решения систем уравнений выше, общее число итераций меньше [34].

Для анализа структуры сложных теплотехнологических схем химико-технологических систем используется топологический метод [38].

Топологический метод заключается в построении материальных, тепловых и эксергетических потоковых графов, составлении уравнений

балансов материальных, тепловых и эксергетических потоков схем, решении систем балансовых уравнений с использованием итерационных методов.

Для решения задач математического моделирования, анализа и оптимизации теплотехнологических схем применяют графы, в частности, потоковые графы. Потоковые графы характеризуют топологию системы и позволяют устанавливать непосредственную взаимосвязь между изменениями технологической топологии и количественными характеристиками состояния системы при определенных входных воздействиях на систему.

Такой граф относится к структурно-топологическим моделям систем, представляющим собой некоторые специальные графические отображения: либо таких качественных свойств технологической топологии или физико-химической структуры системы, по которым можно определить количественные характеристики функционирования системы, либо математических соотношений между переменными и параметрами системы, либо логико-информационных связей между уравнениями, параметрами и переменными операторно-символической математической модели системы [38].

Граф состоит из двух групп элементов: точек и стрелок, соединяющих эти точки. В соответствии со стандартной терминологией точки графа называются его вершинами. Стрелки могут изображаться линиями (как прямыми, так и непрямыми), соединяющими пары точек. Стрелки графа носят название дуг. Граф, в котором направления дуг задаются, называется ориентированным. Граф, в котором направления дуг не задаются – неориентированным. Неориентированные дуги носят название ребер. Граф  $(X, A)$  – это совокупность множества  $X$ , элементы которого называются вершинами, и множества  $A$  упорядоченных пар вершин, элементы которого называются дугами. Как множество  $X$ , так и множество  $A$  содержат конечное число элементов [46].

В качестве алгоритма оптимальной стратегии анализа теплотехнологических схем химико-технологических систем предлагается

использовать методику анализа структуры, внутренних и внешних связей теплотехнологических схем или так называемый структурный анализ [38, 47].

При проведении структурного анализа теплотехнологическая схема отображается в виде структурной схемы, где элементы схемы заданы блоками, а связи между элементами – дугами. Другими словами, схема представлена в виде многоконтурного потокового графа.

Структурный анализ теплотехнологической схемы позволяет выбрать особые дуги схемы, соответствующие совокупности особых разрываемых технологических потоков. Разрыв таких дуг в структуре исходного графа данной теплотехнологической схемы химико-технологической системы превращает этот многоконтурный потоковый граф в эквивалентный ациклический потоковый граф [38]. Такой эквивалентный ациклический потоковый граф позволяет определить последовательность расчета отдельных элементов схемы, заданных вершинами потокового графа.

Алгоритм оптимальной стратегии анализа теплотехнологических схем с использованием потокового графа включает в себя следующие этапы:

- 1) выявление одноконтурных подсистем (контуров) в сложных схемах;
- 2) декомпозиция многоконтурной системы на элементарные подсистемы и взаимосвязанные контурные подсистемы (системы контуров). Элементарные подсистемы теплотехнологических схем химико-технологических систем – это отдельные элементы или одноконтурные подсистемы схемы;
- 3) определение минимального количества технологических потоков, соответствующие дуги которых подлежат разрыву;
- 4) упорядочение полученного в результате разрыва дуг эквивалентного ациклического потокового графа, образовавшегося после выбора минимального количества разрываемых потоков, то есть определение последовательности расчета всей теплотехнологической схемы [38].

Разработка алгоритмов идентификации контуров, декомпозиции сложных теплотехнологических схем химико-технологических систем, определения минимального количества разрываемых технологических потоков



математически сводится к разработке алгоритмов выявления в структуре графа элементарных путей и контуров различной длины. Алгоритмы перечисления в структуре графа разнообразных контуров базируются на анализе свойств матрицы смежности орграфа [38].

Таким образом, теплотехнологическая схема промышленного предприятия характеризуется сложной структурной организацией, объединяющей сотни разнотипных аппаратов прямыми и обратными энергетическими и технологическими потоками. Сложность расчета теплотехнологических схем также обусловлена наличием значительного количества циклов в схеме. Наличие в системе обратных потоков энергии и вещества означает, что в схеме имеются и замкнутые последовательности элементов (контур). Любой контур можно рассчитать только в том случае, если предварительно условно разорвать один из потоков, а затем провести итерационное согласование условно-входных и условно-выходных переменных, определяющих значения параметров потока [48].

При структурном моделировании таких схем в качестве допущения принимается условие, что уравнения, описывающие процессы, происходящие в каждом элементе схемы, известны, заданы системой балансовых уравнений, т.е. параметры выходных потоков для любого элемента схемы можно рассчитать, если известны параметры входных потоков.

Сложность такой задачи зависит от количества контуров, образуемых в моделируемой системе, от числа потоков, образующих контуры. Количество уравнений системы, образующей математическую модель исследуемого объекта, представляющего собой многоконтурную теплотехнологическую схему, значительно возрастает, что вызывает трудности при ее реализации. Преобразование технологической схемы промышленного объекта в объединенный энерготехнологический комплекс неизбежно ведет к ее усложнению, поэтому особую важность приобретает проблема идентификации контуров и определения минимально необходимого количества условно разрываемых потоков [34, 38, 47, 48]. Кроме того, информация об имеющихся в

технологической схеме контурах в случае проведения модернизации какого-либо ее элемента, узла или подразделения позволяет исключить из области анализа те элементы оборудования, которые от них не зависят [48].

Анализ существующих теплотехнологических схем показывает, что разрыв выявленных циклических связей или контуров можно осуществить множеством путей и получить при этом значительное количество вариантов последовательностей расчета. В связи с этим актуальна задача поиска рационального способа, который обеспечил бы уменьшение порядка системы уравнений и уменьшение времени ее расчета [35].

При проведении анализа структуры и связей теплотехнологических схем следует руководствоваться следующими правилами:

1) правильным выбором разрываемых потоков (связей) можно существенно понизить размерность системы уравнений, к решению которых сводится задача расчета сложных теплотехнологических схем. Вместо решения одной системы уравнений высокого порядка задачу можно свести к решению нескольких независимых систем уравнений меньшего порядка. Такая задача является более простой:

2) имеются две операции, с помощью которых удастся понизить размерность решаемой задачи. Первая операция – это выделение в схеме совокупностей элементов, охваченных обратными связями, т. е. образующих контуры, и элементов, которые не входят ни в один контур. Тогда расчет схемы сводится к расчету систем уравнений отдельных контуров и уравнений отдельных элементов, не входящих в контуры. Вторая операция – это выбор внутри каждого контура [35].

Таким образом, основная задача предлагаемого метода анализа структуры, связей теплотехнологических схем состоит в установлении взаимозависимостей между элементами схем, выделении разомкнутых и замкнутых последовательностей элементов схем и определении последовательности расчета [47].

Первым этапом анализа структуры и связей теплотехнологических схем является построение ИС в форме графа, графически отображающего топологию структуры теплотехнологической схемы [49]. ИС является разновидностью структурной схемы.

Для анализа структуры, внутренних и внешних связей теплотехнологических схем строится потоковый граф, представляющий собой взвешенный ориентированный граф (орграф) с заданным направлением дуг, отображающий физико-химические преобразования потоков вещества и энергии, которые осуществляются элементами или узлами теплотехнологических схем химико-технологических систем.

Элемент оборудования в ИС представляется в виде вершины графа или вычислительного информационного блока, в котором на основе заданных входных параметров определяются выходные. Информационные блоки схемы связываются дугами графа, отображающими направленные потоки информации. Элементы оборудования производят физические или химические изменения в потоках вещества или энергии и, следовательно, являются преобразователями входной информации в выходную. Значения параметров входных и выходных потоков любого элемента оборудования связаны между собой системой балансовых уравнений. Если параметры входных потоков элемента оборудования заданы, то, выполнив расчет системы балансовых уравнений, можно найти значения параметров выходных потоков. Таким образом, любой элемент оборудования является вычислительным блоком в форме некоторой группы математических операций для определения неизвестной выходной информации на основе заданной входной. Элементы оборудования, в которых не преобразуется информация, в моделируемом процессе не учитываются.

Параметры, определяющие состояние потока, называются переменными потока. Типичное множество переменных теплового потока должно включать как минимум один расходный и два термодинамических параметра [48]. Кроме того, часто накладываются дополнительные условия, ограничивающие область

допустимых решений. Механические и электрические связи являются однопараметрическими и характеризуются значением мощности. Если материальный поток состоит из нескольких компонентов, то соответствующие параметры задаются для каждого компонента в отдельности. Поток считается известным в том случае, если все его переменные вычислены как выходные параметры соответствующих информационных блоков или если они приняты заранее.

В зависимости от формулировки задачи исследования информационные блок-схемы могут быть представлены в виде вышеупомянутых потоковых графов [48]:

1) материальных потоковых графов (МПП), где МПП – взвешенный по дугам оргграф, который отображает преобразование технологическими операторами системы (информационными блоками, элементами схемы) общих массовых расходов физических потоков системы. Вершины МПП соответствуют технологическим операторам системы, узлам смешения материальных потоков в трубопроводах, источникам и стокам вещества физических потоков. Дуги МПП соответствуют физическим потокам теплотехнологической схемы. Вес каждой дуги материального потокового графа равен общему массовому расходу физического потока, отображаемого этой дугой графа. Для каждой вершины материального потокового графа справедливо уравнение баланса по общим массовым расходам физических потоков для технологического оператора, отображаемого этой вершиной графа [48];

2) тепловых потоковых графов (ТПГ), где ТПГ – взвешенный по дугам оргграф, отображающий преобразование технологическими операторами системы тепловых расходов физических и фиктивных потоков теплоты теплотехнологической схемы. Вершины ТПГ отображают технологические операторы, которые изменяют тепловые расходы физических потоков, узлы смешения, внешние и внутренние (фиктивные) источники и стоки теплоты. Дуги ТПГ соответствуют физическим и фиктивным потокам теплоты. Вес

каждой дуги равен общему массовому расходу физического или фиктивного потока, отображенного этой дугой. Для каждой вершины теплового потокового графа справедливо уравнение баланса расхода теплоты физических и фиктивных потоков для технологического оператора, который этой вершиной графа отображается [35];

3) эксергетических потоковых графов (ЭСПГ), где ЭСПГ – взвешенный по дугам оргграф, отображающий преобразование элементами схемы расходов эксергии физических и фиктивных потоков вещества и энергии, а также потери эксергии в элементах моделируемой системы. Вершины ЭСПГ соответствуют технологическим операторам, осуществляющим преобразование расходов эксергии, а также соответствуют внутренним и внешним расходам эксергии. Дуги ЭСПГ соответствуют потокам эксергии физических и фиктивных потоков вещества и энергии, а также потерям эксергии в элементах системы. Вес дуг равен расходам эксергии. Для каждой промежуточной вершины эксергетического потокового графа справедливо уравнение баланса эксергии [38, 48].

Материальные, тепловые и эксергетические потоковые графы являются ориентированными, так как для каждого технологического и энергетического потока системы задано строго определенное направление; ассиметричными, так как не все связанные элементы теплотехнологической схемы соединены друг с другом обратными потоками; связными, так как все элементы в системе связаны друг с другом технологическими и энергетическими потоками.

Представление ИБС в цифровой форме – реализация второй стадии анализа структуры теплотехнологических схем, их внутренних и внешних связей. Для представления топологии ИБС в цифровой форме [47 – 49] широко используются матрицы процесса, потоков, инцидентий, смежности и др. Одним из наиболее удобных способов представления ИБС для идентификации имеющихся контуров является представление ИБС в виде матрицы смежности или ее аналога, списка смежности [47].

Матричное представление дает удобный способ описания графа, не связанный с перечислением вершин и дуг графа или построением диаграмм. Машинные программы оптимизационных алгоритмов неизменно используют матричное описание графа [46, 50, 51].

Пусть  $G(V, E)$  – ориентированный граф без параллельных дуг, в котором  $V = \{v_i, v_j, \dots, v_n\}$  – множество вершин графа;  $E$  – множество ребер графа. Матрицей смежности  $A = [a_{ij}]$  графа  $G$  называется матрица размерностью  $n \times n$ , элементы которой  $a_{ij}$  определяются следующим образом:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (v_i, v_j) \in E \\ 0, & \text{если } (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (2.1)$$

Таким образом, матрица смежности представляет собой квадратную матрицу, показывающую наличие или отсутствие связей между блоками ИБС. Цифра 1 в матрице смежности указывает на связь, направленную из блока, заданного номером строки, в блок, заданный номером столбца. Цифра 0 означает, что связи в этом направлении нет. Если ни один элемент не связан сам с собой, то диагональ матрицы содержит только нули [42, 48].

Матрица смежности позволяет выявить разомкнутые последовательности информационных блоков или элементов ИС, а также замкнутые последовательности элементов или контуры.

Контуром является путь, у которого начальная и конечная вершина совпадают [46].

Для выявления разомкнутых последовательностей информационных блоков в матрице смежности осуществляется поиск столбцов и строк, содержащих только нули. Если в матрице обнаружен столбец или строка, содержащая только «нулевые» элементы, это означает, что ни один блок ИС не связан с блоком, соответствующим этому столбцу или строке. Сам блок имеет только внешние входящие потоки, а потому может быть отнесен к разомкнутой последовательности и удален из матрицы смежности путем вычеркивания соответствующих ему столбца и строки. Полученная матрица вновь

анализируется на наличие столбцов и строк, имеющих только нули, пока в матрице не останется «нулевых» столбцов. Итоговая матрица смежности, образованная путем удаления «нулевых» строк и столбцов является сокращенной матрицей смежности [6].

Любая сложная технологическая схема, как правило, является замкнутой циклической, и, чтобы произвести ее расчет, необходимо идентифицировать содержащийся в ней контур и разорвать обратные связи. Разрываемым может быть любой поток, входящий в контур, но в случае многоконтурной системы целесообразнее разрывать дугу, общую для нескольких контуров. Тем самым сокращается объем вычислений. Наиболее удобным с этой точки зрения представляется метод, основанный на анализе матриц смежности и циклов [48].

Таким образом, следующий этап анализа структуры и связей теплотехнологических схем – это определение связей между информационными блоками на основе анализа матриц смежности, идентификация имеющихся в схеме контуров. [46, 50, 51]. Для этого сокращенная матрица смежности умножается сама на себя по правилам

булевой алгебры: элемент  $(i, j)$  произведения двух матриц  $A$  и  $B$  –  $\sum_{k=1}^m a_{ik} b_{kj}$ , где

$a_{ik}$  и  $b_{kj}$  – элементы матриц  $A$  и  $B$  соответственно. При перемножении матриц используются правила булевой алгебры, а именно:  $0+0=0$ ;  $0+1=1$ ;  $1+1=1$ ;  $0\cdot0=0$ ;  $0\cdot1=0$ ;  $1\cdot1=1$ .

Более экономичной и простой, с точки зрения обработки данных формой представления графа является таблица связей или так называемый список смежности, отображающий матрицу смежности в более простой и наглядной форме. Если граф имеет  $p$  вершин, а  $m$  – максимальная степень вершины, определяющая количество вершин, смежных с нею, то таблица связей представляет собой двумерный массив из  $p$  строк и  $t$  столбцов. В произвольной  $i$ -й строке хранится список смежностей вершины с номером  $i$ , где  $i = 1, 2, \dots, p$ . Исходная матрица смежности  $A$  характеризуется сильной разреженностью, а

представленный метод позволяет избежать неэффективных действий, связанных с большим объемом вводимых данных.

Полученная в результате перемножений матрица  $A$  в  $n$ -й степени показывает связи, которые проходят из любого элемента оборудования к любому другому элементу оборудования через  $p$  потоков. Цифра 1 в матрице  $A^n$  означает, что существует, по крайней мере, один путь через  $p$  потоков из элемента, соответствующего данной строке, к элементу, соответствующему данному столбцу. Цифра 0 означает отсутствие такой связи. Если матрица  $A^n$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) получена для замкнутой схемы, то на ее диагонали в результате должны появиться единицы. Тогда любой элемент оборудования, соответствующий диагональной единице, имеет связь через  $p$  потоков с самим собой, т.е. выявляется контур. Таким образом, идентифицируются все контуры [47 – 49].

Кроме идентификации существующих в информационной блок-схеме замкнутых последовательностей блоков или так называемых контуров выявляются также разомкнутые внутренние последовательности блоков. То есть выявляются те блоки ИС, которые не входят ни в один контур и, соответственно, могут быть рассчитаны отдельно.

Выявленные контуры могут быть объединены в системы контуров.

Для определения минимального количества потоков, условный разрыв которых позволит провести расчет всей теплотехнологической схемы, применяется метод, использующий матрицы цикла [35, 47 – 49]. Основные показатели матрицы циклов – ранг контура и частота потока. В матрице цикла ранг контура соответствует числу потоков в контуре, а частота потока означает, сколько раз данный поток появляется в различных контурах. Минимальное число потоков, которые следует разорвать, определяется при предположении, что поток « $i$ » включается в поток « $j$ », если каждый контур, в который входит поток « $i$ », содержит также и поток « $j$ ». Минимальное количество разрываемых потоков можно получить, если в первую очередь разорвать поток, имеющий максимальную частоту, а затем потоки, имеющие минимальный ранг и максимальную частоту.



теплотехнологических схем представлена на рисунке 2.14.



Рис. 2.14 Блок-схема алгоритма структурного анализа сложных теплотехнологических схем

Программа позволяет идентифицировать замкнутые контуры, построить матрицу цикла, сокращенную матрицу цикла и определить потоки, разрыв которых позволит провести расчет технологической схемы по одному из наиболее оптимальных вариантов. Ниже приводятся пояснения к основным операциям, реализуемым в программе.

В блоках 1 – 4 вводятся исходные данные в виде сокращенной матрицы смежности  $A(i,j)$  и максимальной степени перемножения  $P$  сокращенной матрицы смежности; идентифицируются имеющиеся контуры.

С целью выявления разомкнутых последовательностей информационных блоков (или элементов схемы) осуществляется сокращение матрицы смежности, а именно удаление строк и столбцов, содержащих только нули. В блоке 2 формируется первый элемент списка диагоналей при степени перемножения  $k=1$ , в который заносятся все элементы (блоки) сокращенной матрицы смежности, на диагоналях которых имеются единицы. В блоке 3 сокращенная матрица смежности перемножается сама на себя  $k$  раз (при изменении  $k$  от 2 до  $P$  с шагом 1) и для каждой степени перемножения формируются списки элементов диагоналей.

В блоке 4 определяются контуры в степени перемножения  $k$  (при изменении  $k$  от 2 до  $P$  с шагом 1) и формируются  $k$ -ые элементы списка контуров.

В блоках 5 и 6 формируются матрица циклов, и сокращенная матрица циклов (содержит только разрываемые потоки) и осуществляется вывод полученных результатов [6, 49].

В качестве примера рассмотрим анализ структуры и связей ректификационной установки как элемента теплотехнологической схемы (рис. 48). Граф соответствующей информационной блок-схемы представлен на рисунке 2.16.

Исходная матрица смежности, отображающая внутренние связи информационной блок-схемы, представлена в таблице 2.1.

В результате четырех перемножений матрицы смежности самой на себя получены результаты, представленные в таблице 2.2.

Наличие единицы на диагонали матрицы смежности означает, что элемент ИС, соответствующий номеру строки и, соответственно, номеру столбца, входит в состав контура. Если матрица смежности получена в результате первого перемножения, то данный блок ИС входит в контур, включающий в себя два блока или потока, если в результате второго перемножения – три блока или потока и т. д.

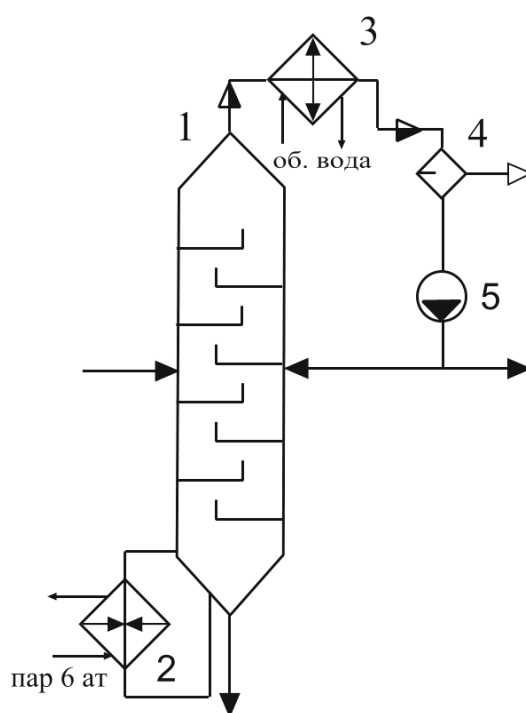


Рис. 2.15 Схема ректификационной установки:

1 – ректификационная колонна; 2 – кипятильник; 3 – дефлегматор;  
4 – сепаратор; 5 – насос

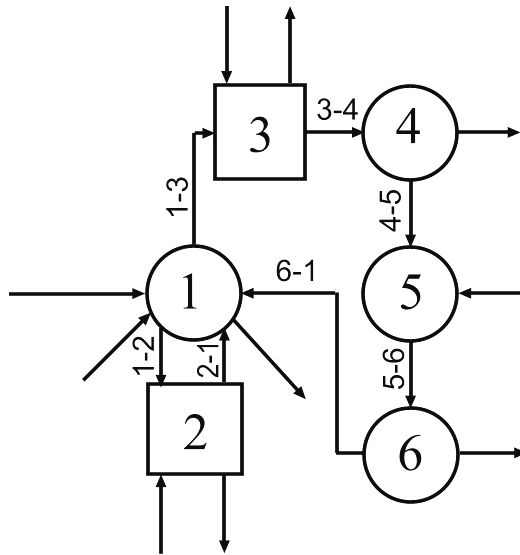


Рис. 2.16 Информационная блок-схема ректификационной установки:

1 – ректификационная колонна; 2 – кипятильник; 3 – дефлегматор;  
 4 – сепаратор; 5 – насос; 6 – трубопроводная арматура; 1-2, 2-1, 1-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-1 – технологические и энергетические потоки

Таблица 2.1

Матрица смежности для ректификационной установки

Номер блока, из которого выходит поток	Номер блока, в который направляется поток						
		1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	0	0

Если же единица в матрице смежности расположена не на диагонали, то из этого следует, что имеет место разомкнутая последовательность блоков или путь из блока, заданного номером строки, в блок, заданный номером столбца. При первом перемножении выявляется путь, проходящий через два потока, при втором – через три и т. д.

## Перемножения матрицы смежности

Первое перемножение							
	Номер блока, в который направляется поток						
		1	2	3	4	5	6
Номер блока, из которого выходит поток	1	1	0	0	1	0	0
	2	0	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	0
	4	0	0	0	0	0	1
	5	1	0	0	0	0	0
	6	0	1	1	0	0	0
Второе перемножение							
	Номер блока, в который направляется поток						
		1	2	3	4	5	6
Номер блока, из которого выходит поток	1	0	1	0	0	1	0
	2	1	0	0	1	0	0
	3	0	0	0	0	0	1
	4	1	0	0	0	0	0
	5	0	1	1	0	0	0
	6	1	0	0	1	0	0
Третье перемножение							
	Номер блока, в который направляется поток						
		1	2	3	4	5	6
Номер блока, из которого выходит поток	1	1	0	0	1	0	1
	2	0	1	0	0	1	0
	3	1	0	0	0	0	0
	4	0	1	1	0	0	0
	5	1	0	0	1	0	0
	6	0	1	0	0	0	1
Четвертое перемножение							
	Номер блока, в который направляется поток						
		1	2	3	4	5	6
Номер блока, из которого выходит поток	1	1	1	0	0	1	0
	2	1	0	0	1	0	1
	3	0	1	1	0	0	0
	4	1	0	0	1	0	0
	5	0	1	0	0	0	1
	6	1	0	0	1	0	1

Матрица циклов для ИС ректификационной установки, дающая наглядную информацию о составе выявленных контуров, представлена в таблице 2.3.

Далее осуществляется поиск потоков, условный разрыв которых позволит рассчитать выявленные контуры. В данном случае частота всех потоков одинакова. Тогда условным разрывом потока 1-2 или потока 2-1 размыкается

первый контур, условным разрывом какого-либо из потоков 1-3, 3-4, 4-5, 5-6 или 6-1 – второй контур.

Таблица 2.3

Матрица циклов для ИС ректификационной установки

Номер контура	Номер потока						Ранг контура	
	1-2	2-1	1-3	3-4	4-5	5-6		6-1
1	1	1	0	0	0	0	0	2
2	0	0	1	1	1	1	1	5
Частота потока	1	1	1	1	1	1	1	

Таким образом, анализ структуры и связей теплотехнологической схемы позволяет провести декомпозицию схемы, а именно выявить разомкнутые последовательности элементов схемы и выделить в исходной схеме отдельные контуры, в результате чего расчет ИС теплотехнологической схемы сводится к расчету систем балансовых уравнений отдельных контуров и элементов [47].

Применение структурного анализа позволит, помимо определения последовательности расчета с минимальным количеством итераций/допущений, также преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей. Данные о них зачастую отсутствуют на производствах [47, 52, 53], но являются необходимыми для оценки параметров потребляемых энергоресурсов, сбросной теплоты и эффективности ее использования на производстве, что позволит выбрать наиболее выгодный вариант повышения эффективности энергокомплекса промышленного предприятия.

### **3 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

#### **3.1 Информационная система производства бумаги и картона**

Информационная система производства бумаги и картона представлена ориентированным графом (ИС), отображающим топологию исходной теплотехнологической схемы (рис. 3.1 – 3.4) [6], матричной моделью (матрицей смежности) с указанием направления связей технологических и энергетических потоков между элементами (рис. 3.5 – 3.6) [42]. Матрица смежности представлена в виде фрагмента. Размерность матрицы 139\*139 по количеству элементов в системе (после сокращения матрицы – удаления элементов, входящих во внешние цепочки элементов вне контуров).

Далее информационная система используется для:

- перемножения матрицы смежности самой на себя;
- определения внутренних связей между элементами схемы, отбрасывания внешних связей;
- нахождения замкнутых (контуров) и незамкнутых внутренних (цепочек) последовательностей элементов;
- определения количества контуров во всей системе, составляющих элементов, выявить наличие систем взаимосвязанных контуров;
- определение минимального количества потоков, разрыв которых позволяет оптимизировать схему и получить ациклический граф, т.е. граф без циклов;
- получить последовательность для расчетов путем разрыва минимального количества потоков, определенных в предыдущем шаге алгоритма.

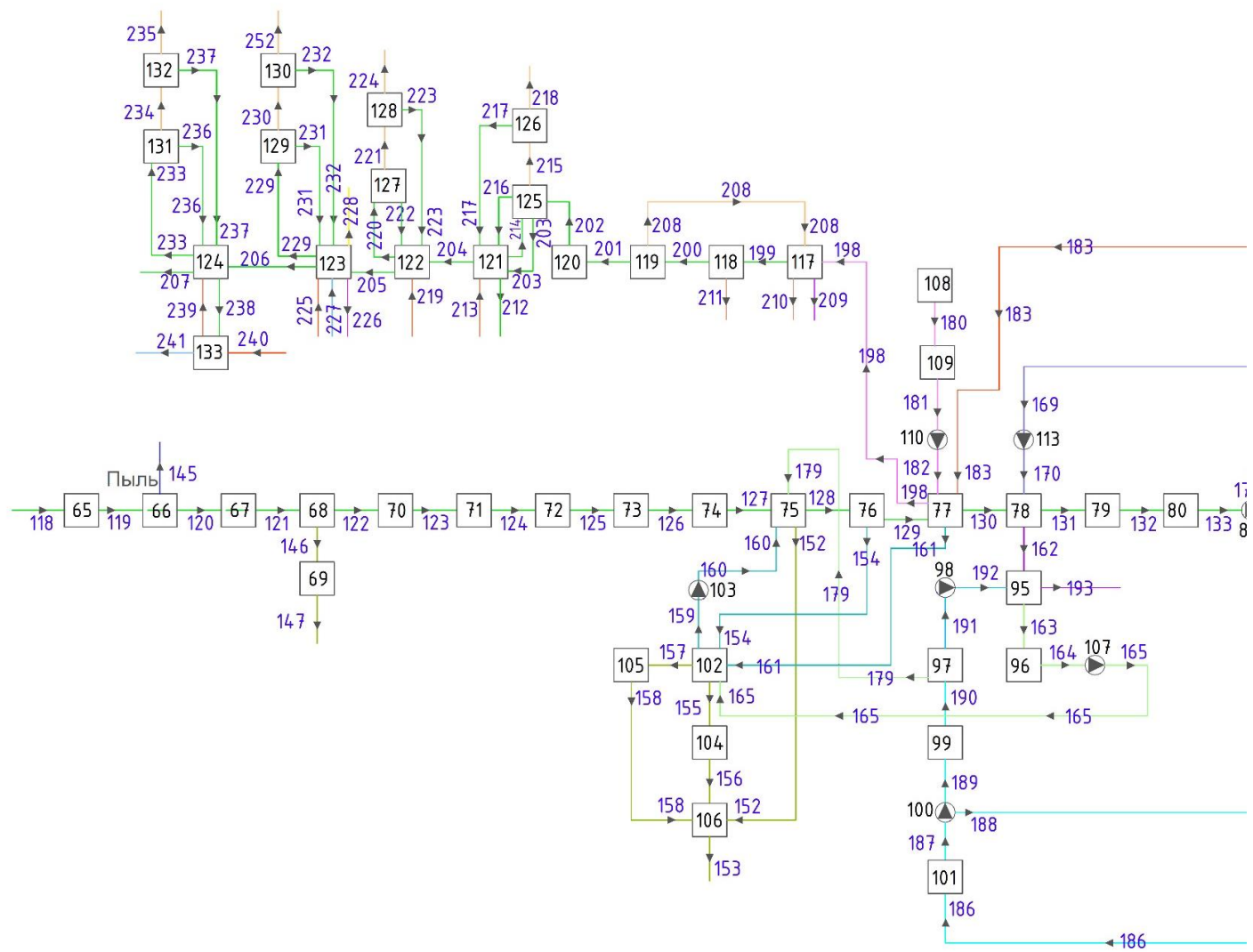


Рис. 3.1 Информационная схема производства бумаги и картона



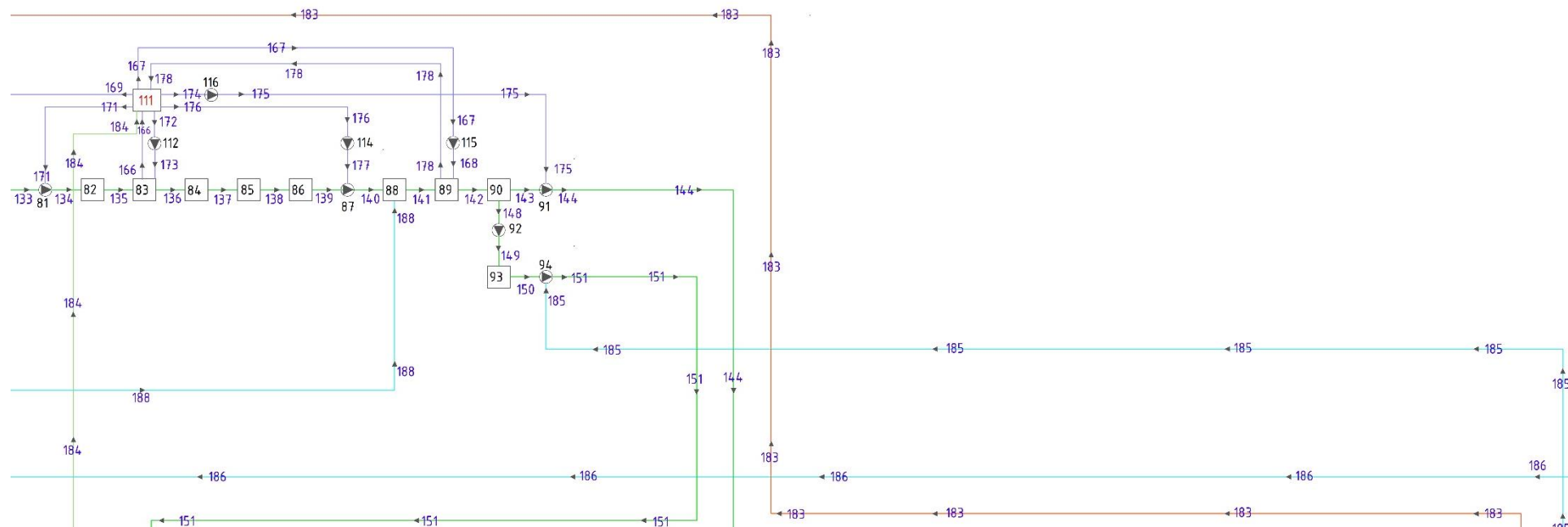


Рис. 3.2 Информационная схема производства бумаги и картона (продолжение)

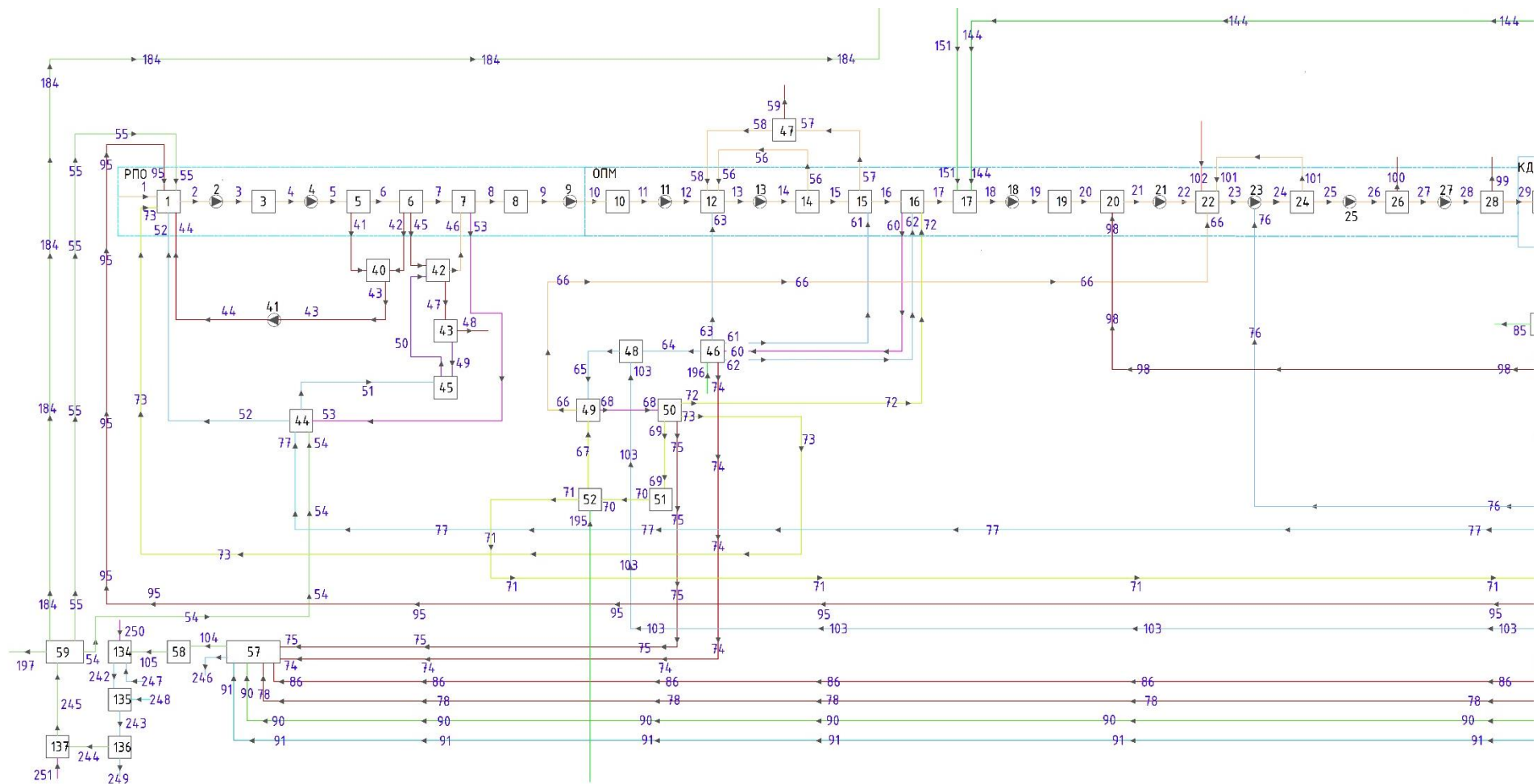


Рис. 3.3 Информационная схема производства бумаги и картона (продолжение)

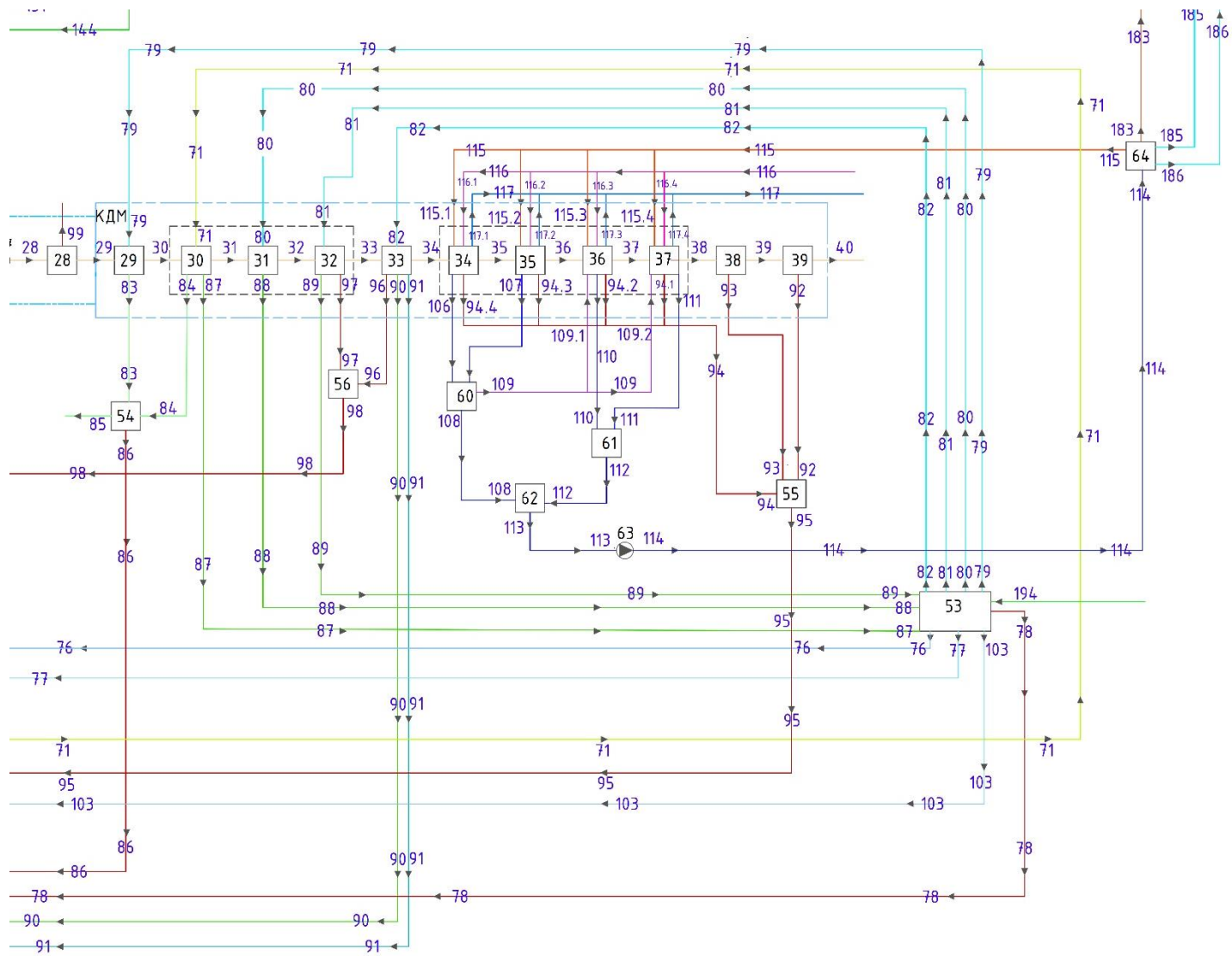


Рис. 3.4 Информационная схема производства бумаги и картона (продолжение)

	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	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
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												56			15																								
15																16																							
16																	17																						
17																		18																					
18																			19																				
19																					20																		
20																						21																	
21																							22																
22																								23															
23																									24														
24																										25													
25																										26													
26																											27												
27																												28											
28																													29										
29																														30									
30																															31								
31																																32							
32																																	33						
33																																		34					
34																																			35				
35																																				36			
36																																						36	
37																																							

Рис. 3.5 Матрица смежности схемы производства бумаги и картона (фрагмент) (продолжение)



### 3.2 Программное обеспечение системного анализа для проведения термодинамических расчетов сложноструктурированными промышленными комплексами

На данный момент методика проведения системного анализа в технических системах рассматривает реализацию структурного анализа и дальнейших термодинамических расчетов 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 программе CHEMCAD (для химических и нефтехимических производств), показанной на рис. 3.7 можно частично провести термодинамический анализ.

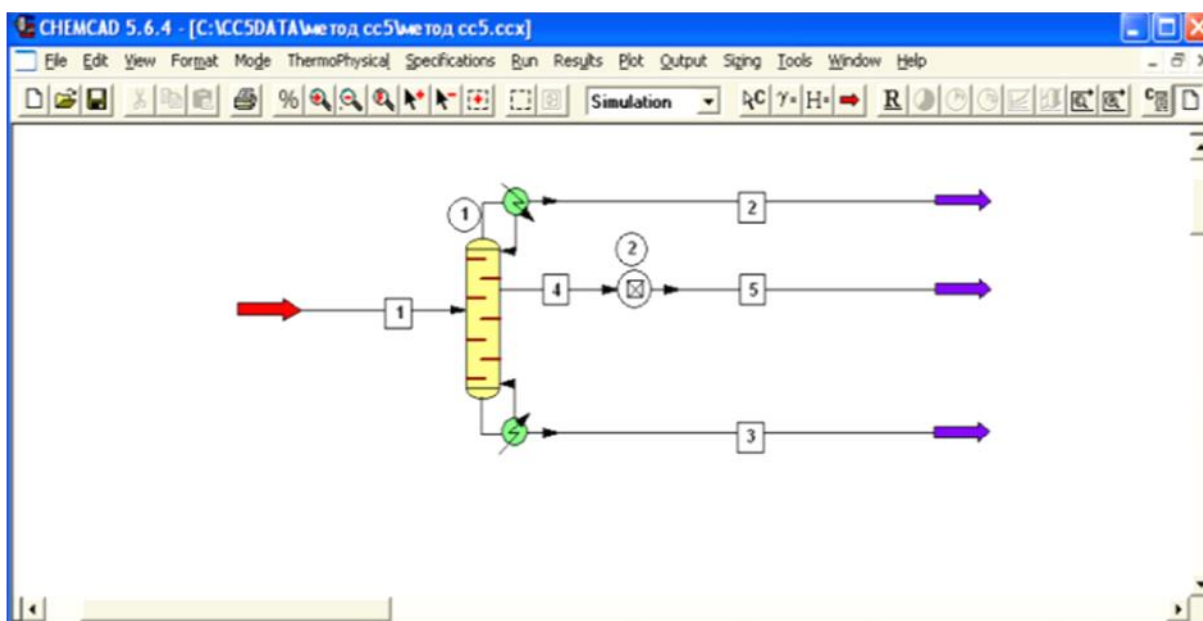


Рис. 3.7 CHEMCAD при проведении термодинамических расчетов

В среде разработки LabVIEW, показанной на рис. 3.8, можно построить структуру схемы и привязать параметры к потокам. Однако оптимальную последовательность расчета в этих программных продуктах нельзя определить. Кроме того, при расчете схем с обратными связями с использованием LabVIEW

сохраняется необходимость многократных итераций. Следовательно, целесообразна разработка программного обеспечения для одновременного проведения и структурного и термодинамического анализа.

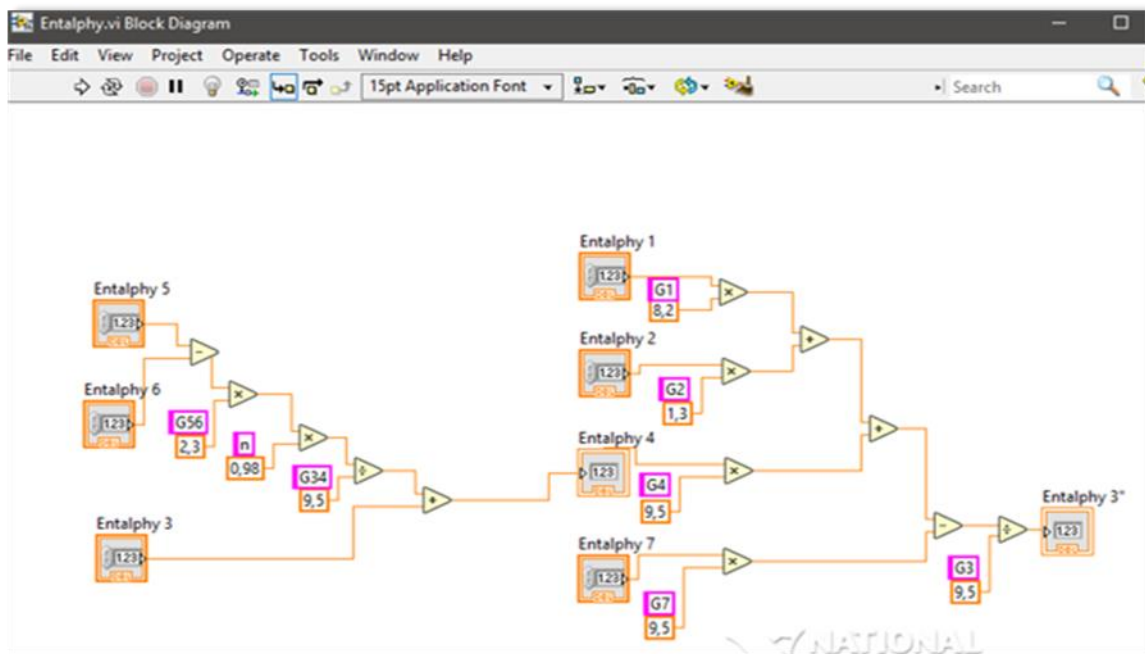


Рис. 3.8 Применение LabVIEW при проведении термодинамических расчетов

Для проведения системного анализа программному обеспечению требуется схема системы, представленная в виде матрицы смежности; для технической системы: информации о энтальпии и расходу вещества каждого потока и формулы для каждой технической системы.

В разработанной для проведения системного анализа программе предусмотрены два варианта ввода данных: ввод данных вручную, для которого необходимо указать размер матрицы смежности и количество потоков в данной системе, и ввод данных через указание адреса файла на жестком диске с необходимыми для анализа данными.

Интерфейс окна для выбора способа ввода данных системы представлен на рис. 3.9.

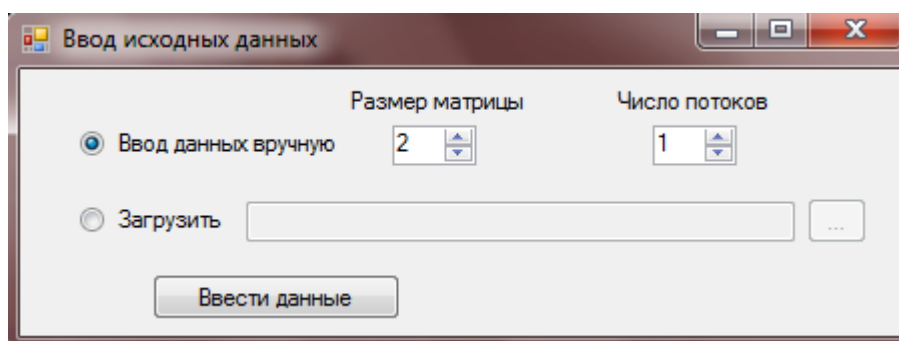


Рис. 3.9 Окно выбора варианта ввода данных

После выбора варианта ввода данных появляется окно с элементами для ввода матрицы смежности, информации о потоках и информации об установках. В зависимости от выбранного ранее варианта ввода данных вышеперечисленные элементы окна изначально пустые (для случая ручного ввода) или заполненные данными из выбранного файла. Пользователь имеет возможность либо сохранить введенные в окно данные в файл формата .xls, либо начать следующий этап.

Интерфейс окна для ввода данных представлен на рис. 3.10.

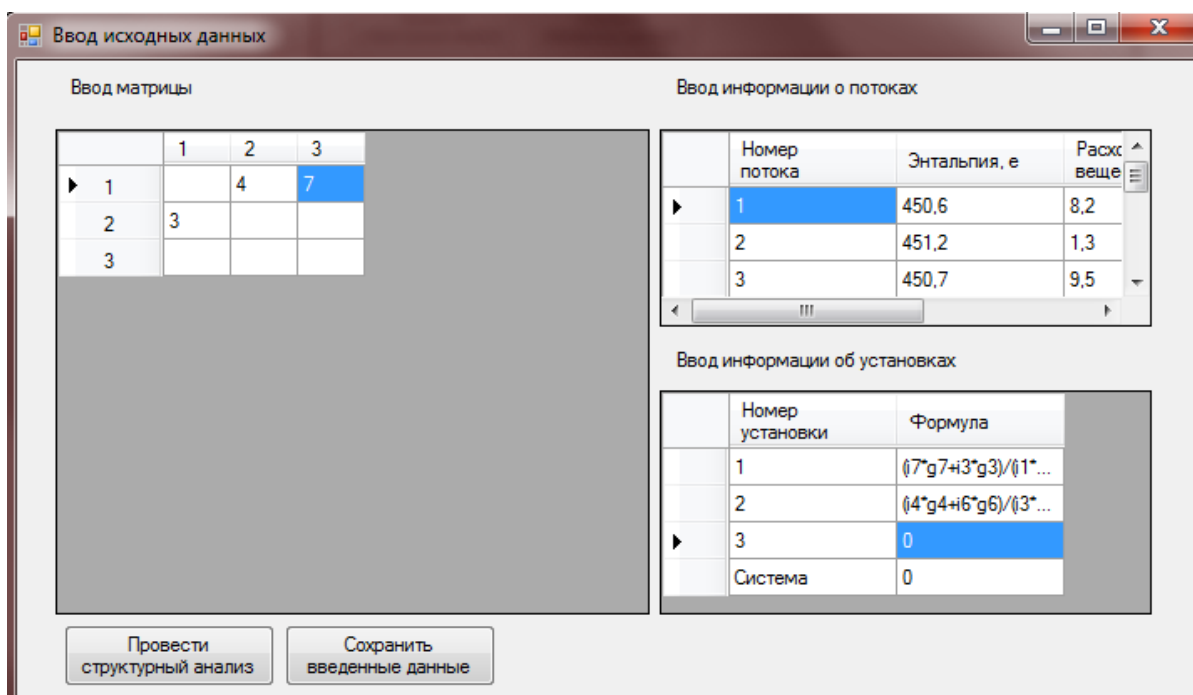


Рис. 3.10 Окно программы с введенными данными



## Функция загрузки данных с файла Excel:

```
public void InitializeTablesExcel(string path)
{
    //Создание объекта для работы с Excel
    Microsoft.Office.Interop.Excel.Application ObjExcel = new
Microsoft.Office.Interop.Excel.Application();
    //Открытие книги Excel
    Microsoft.Office.Interop.Excel.Workbook ObjWorkBook = ObjExcel.Workbooks.Open(path, 0,
false, 5, "", "", false, Microsoft.Office.Interop.Excel.XlPlatform.xlWindows, "", true, false, 0, true,
false, false);
    //Выбор таблицы(лист)
    Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet ObjWorkSheet;
    ObjWorkSheet = (Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[2];
    Microsoft.Office.Interop.Excel.Range range;

    //взятие количества установок и потоков
    range = ObjWorkSheet.get_Range("A1", "A1");
    StructureAnalysis.N = Convert.ToInt32(range.Text.ToString());
    range = ObjWorkSheet.get_Range("B1", "B1");
    StructureAnalysis.NP = Convert.ToInt32(range.Text.ToString());

    //инициализация элементов для заполнения информации о системе
    InitializeTables();

    char k = 'A';
    ObjWorkSheet = (Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[1];

    //заполнение матрицы смежности
    for (int i = 1; i <= StructureAnalysis.N; i++, k++)
    {
        for (int j = 1; j <= StructureAnalysis.N; j++)
        {
            range = ObjWorkSheet.get_Range(k + j.ToString(), k + j.ToString());
            dataGridView1[i-1, j-1].Value = Convert.ToInt32(range.Text.ToString());
        }
    }
}
```

```
}
```

```
ObjWorkSheet = (Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[3];
```

```
//заполнение информации об установках (формул)
```

```
for (int i = 1; i <= StructureAnalysis.N; i++)
```

```
{
```

```
    range = ObjWorkSheet.get_Range("A" + i.ToString(), "A" + i.ToString());
```

```
    dataGridView3[1, i-1].Value = range.Text.ToString();
```

```
}
```

```
range = ObjWorkSheet.get_Range("A" + (StructureAnalysis.N+1).ToString(), "A" +
```

```
(StructureAnalysis.N+1).ToString());
```

```
dataGridView3[1, StructureAnalysis.N].Value = range.Text.ToString();
```

```
ObjWorkSheet = (Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[4];
```

```
//заполнение данных о потоках
```

```
for (int i = 1; i <= StructureAnalysis.NP; i++)
```

```
{
```

```
    range = ObjWorkSheet.get_Range("A" + i.ToString(), "A" + i.ToString());
```

```
    dataGridView2[1, i-1].Value = Convert.ToInt32(range.Text.ToString());
```

```
    range = ObjWorkSheet.get_Range("B" + i.ToString(), "B" + i.ToString());
```

```
    dataGridView2[2, i - 1].Value = Convert.ToInt32(range.Text.ToString());
```

```
    range = ObjWorkSheet.get_Range("C" + i.ToString(), "C" + i.ToString());
```

```
    dataGridView2[3, i - 1].Value = Convert.ToInt32(range.Text.ToString());
```

```
}
```

```
//Удаление объекта для работы с Excel
```

```
ObjExcel.Quit();
```

```
}
```

Далее проводится анализ введенной матрицы смежности. В следующем окне будут представлены результаты анализа, такие как все перемножения матрицы, найденные в матрице циклы в виде матрицы циклов, найденные незамкнутые последовательности, результаты разбиения найденных циклов, матрица смежности без незамкнутых внутренних цепочек элементов, которые были удалены в результате разбиения циклов, вычисленная оптимальная последовательность расчета.

Интерфейс окна результатов структурного анализа представлен на рис. 3.11. Полученная последовательность расчёта в окне результатов представлена на рис. 3.12. с расчетом параметров потоков представлено на рис. 3.13.

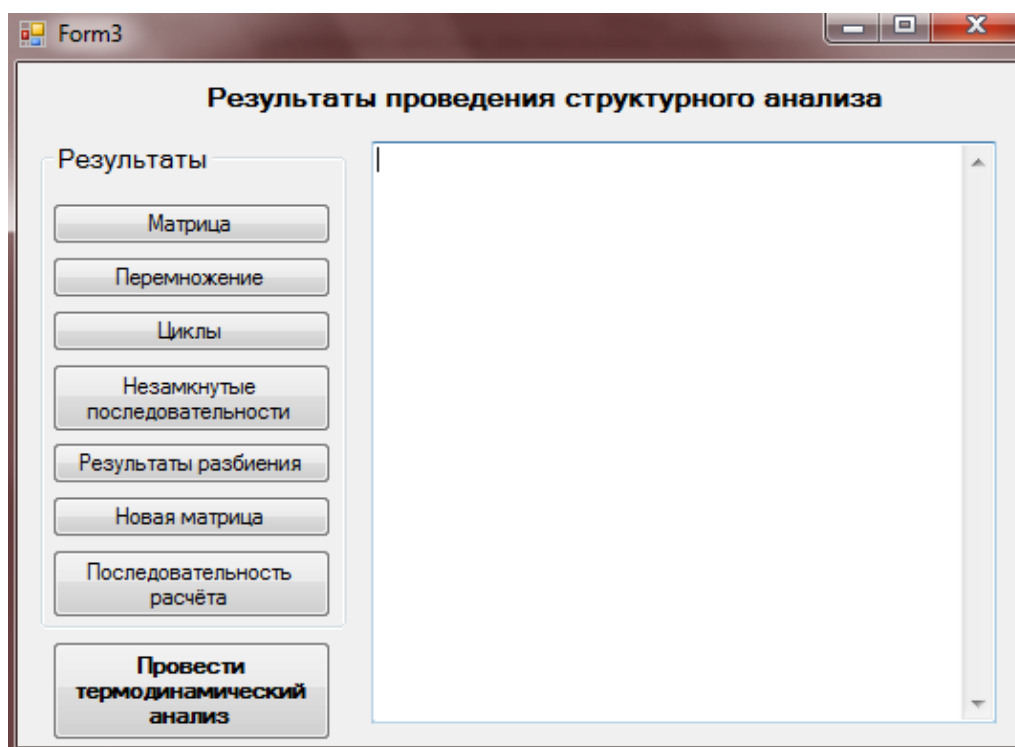


Рис. 3.11 Окно результатов структурного анализа

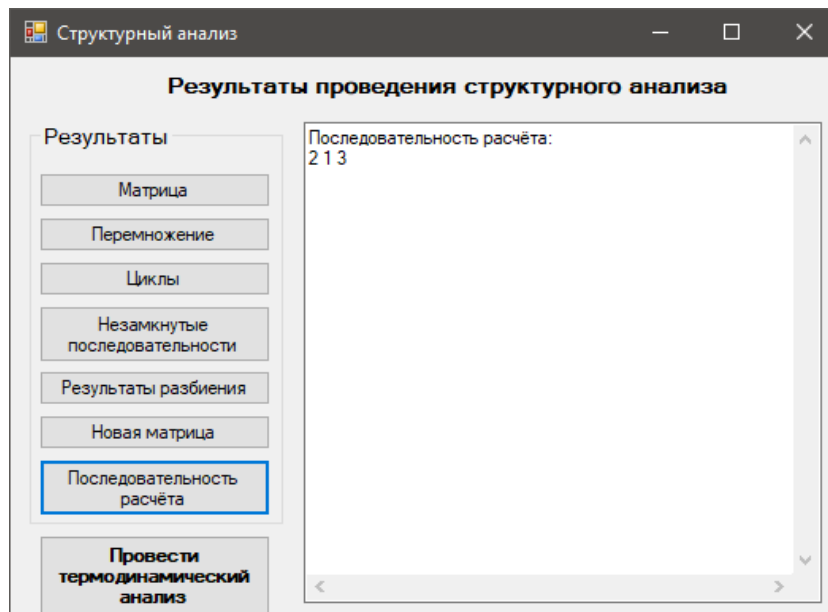


Рис. 3.12 Полученная последовательность расчета

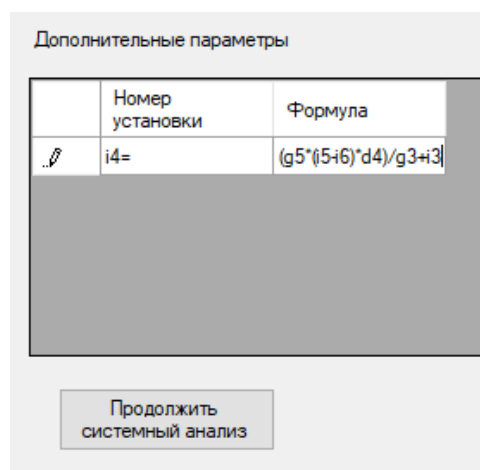


Рис. 3.13 Окно результатов анализа информационной системы

Функции перемножения матрицы:

```
public static void Multiply()
{
    int dimension = N;
    var result = new bool[dimension, dimension];
    for (var i = 0; i < dimension; i++)
    {
        for (var j = 0; j < dimension; j++)
        {
            result[j, i] = false;
        }
    }
}
```

```

    for (var k = 0; k < matrix.GetLength(1); k++)
    {
        result[j, i] |= matrixUmn[j, k] && matrixUnits[k, i];
    }
}
}

matrixUmn = result;
}

```

Функция поиска единиц на диагонали матрицы:

```

public static int SearchDiagonalUnits(int num) //поиск единиц на диагонали матрицы
{
    bool result = false;

    Cycle Temp = new Cycle();
    Temp.elements = new List<CellsCycle>(); //найденный цикл
    Temp.multiplyN = num;

    for (int i = 0; i < N; i++)
    {
        if (matrixUmn[i, i])
        {
            CellsCycle TempCell = new CellsCycle();
            TempCell.element = i;
            Temp.elements.Add(TempCell);

            result = true;
        }
    }

    if (result)
        return devisionCycle(Temp);
    else
        return 0;
}

```

```
}
```

### Функция поиск последовательности расчёта:

```
public static void SearchSequences()
{
    //список всех известных элементов
    List<int> KnowElement = new List<int>();
    bool isEmpty, isExist;
    //цикл до тех пор, пока в KnowElement не будут находиться все элементы
    while (KnowElement.Count != N)
    {
        //цикл по столбцам
        for (int col = 0; col < N; col++)
        {
            //список всех потоков в столбце
            List<int> MetaSearch = new List<int>();
            //список всех известных потоков
            List<int> Search = new List<int>();

            isEmpty = true;
            //цикл по строкам
            for (int row = 0; row < N; row++)
            {
                //проверка, есть ли поток между элементами
                if (newMatrix[col, row] != 0)
                {
                    isEmpty = false;
                    //добавление в список найденного потока
                    MetaSearch.Add(row);

                    isExist = false;
                    //проверка, есть ли данный элемент в списке известных элементов
                    for (int k = 0; k < KnowElement.Count; k++)
                    {
                        if (KnowElement[k] == row)
```

```

    {
        isExist = true;
    }
}
//в случае существования в списке известных элементов текущего элемента
//добавление в список потока
if (isExist)
    Search.Add(row);
}
}

//если столбец пустой и его номера нет в списке,
//то его номер добавляется в список известных элементов
if (isEmpty)
{
    isExist = false;
    for (int k = 0; k < KnowElement.Count; k++)
    {
        if (KnowElement[k] == col)
        {
            isExist = true;
        }
    }
    if (!isExist) KnowElement.Add(col);
}

//если в столбце список всех потоков и список известных потоков одинаковы
//и номера столбца нет в списке известных элементов, то номер столбца
//добавляется в список известных элементов
if (MetaSearch.Count == Search.Count)
{
    isExist = false;

    for (int k = 0; k < KnowElement.Count; k++)
    {

```

```

        if (KnowElement[k] == col)
        {
            isExist = true;
            break;
        }
    }
    if (!isExist)
        KnowElement.Add(col);
}

}

//Вывод полученной последовательности
calculationSequences += "Последовательность расчёта:";
calculationSequences += Environment.NewLine;

sequences = new List<int>();

for (int k = 0; k < KnowElement.Count; k++)
{
    sequences.Add(KnowElement[k]);
    calculationSequences += (KnowElement[k] + 1) + " ";
}
}

```

Далее проводится термодинамический анализ (рис. 3.14). Результат термодинамического анализа в данном случае представлен как вычисленный к.п.д. каждого элемента и системы в целом. Эта эффективность рассчитывается через введенные формулы технологических установок и данных о потоках по последовательности, рассчитанной на этапе структурного анализа.

Интерфейс окна результатов структурно-термодинамического анализа представлен на рис. 3.14. Данные потоков и формулы для проведения



дальнейшей оценки энергоэффективности системы, представлены на рис. 3.15. Полученные данные об энергоэффективности системы представлены на рис. 3.16.

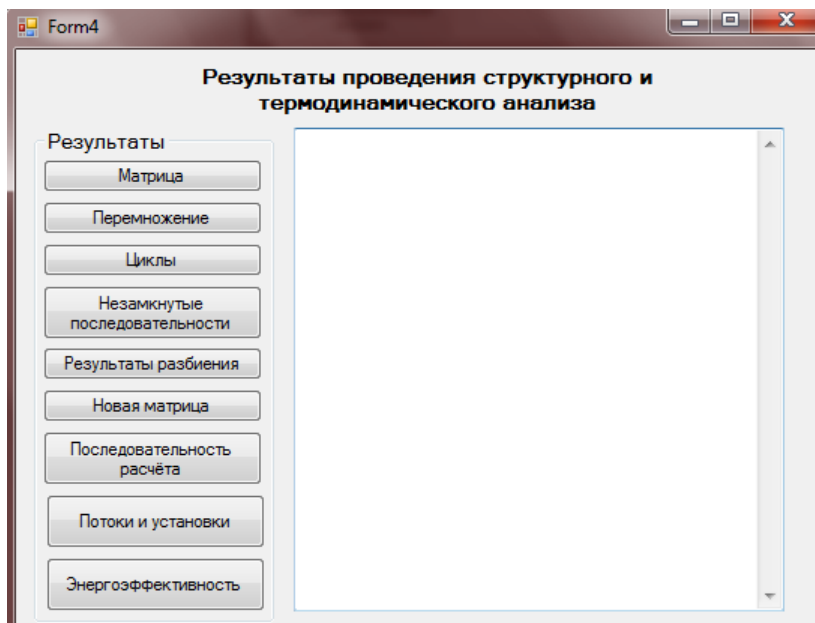


Рис. 3.14 Окно результатов структурно-термодинамического анализа

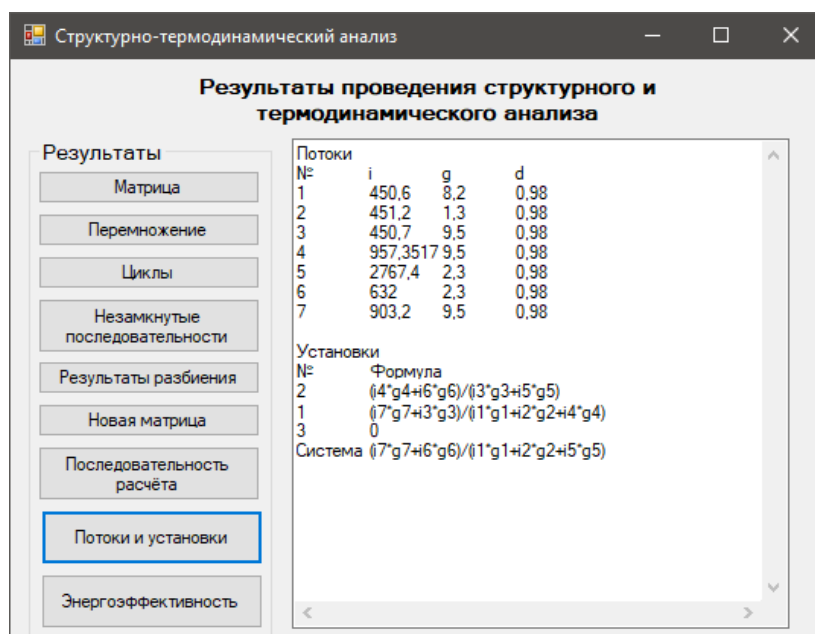


Рис. 3.15 Данные потоков и ввод формул для оценки эффективности системы и входящих в нее элементов

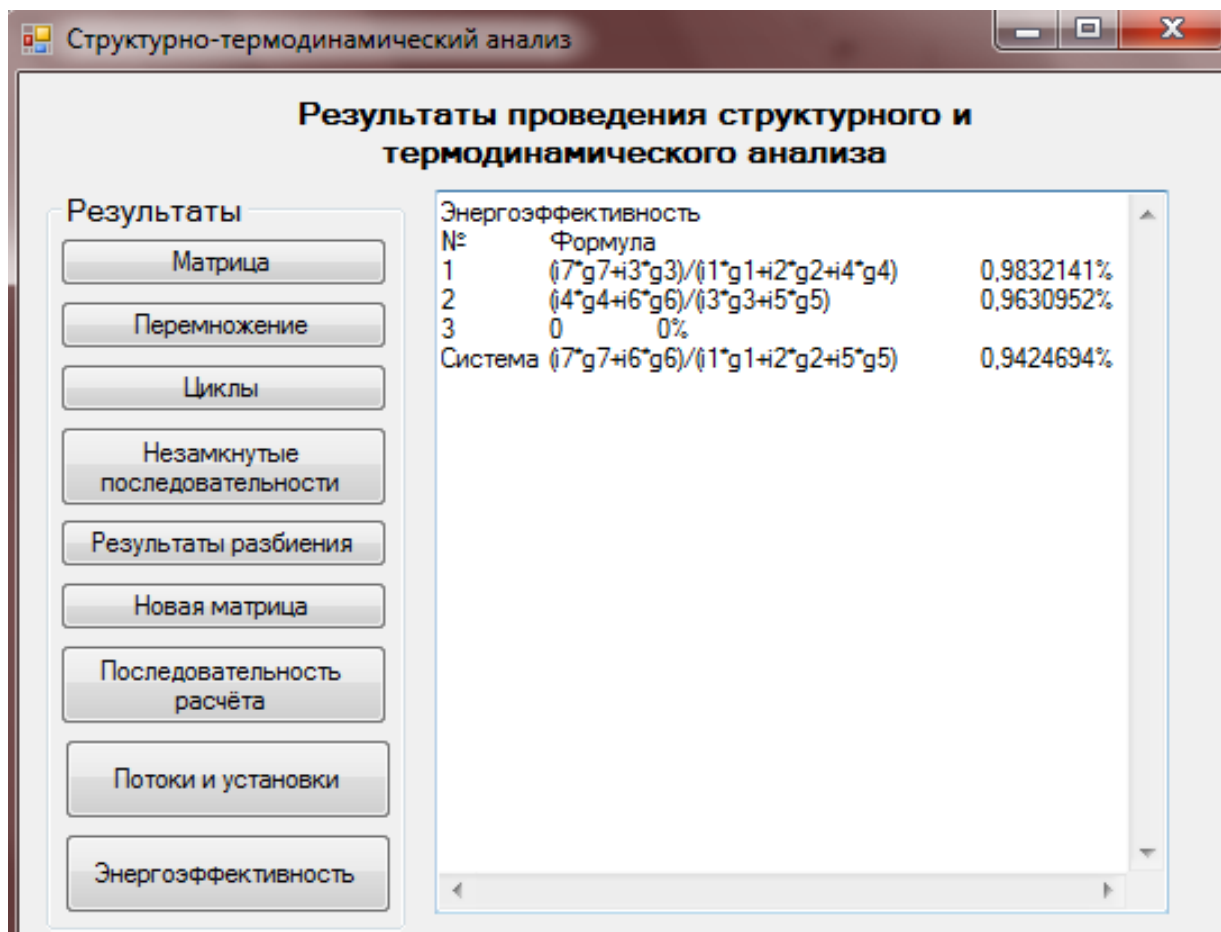


Рис. 3.16 Полученные данные об энергоэффективности системы

### 3.3 Результаты структурного анализа теплотехнологической схемы производства бумаги и картона

Матрица смежности является табличным представлением графа - изначальной теплотехнологической схемы производства [35, 42]. Матрица смежности схемы производства бумаги и картона представляет собой большую таблицу размером 139\*139 (см. Главу 3.1 рис. 3.5 – 3.6). Наличие «1» на пересечении строки и столбца матрицы смежности характеризует наличие связи или потока, направляемого из элемента, заданного номером строки, в элемент, заданный номера столбца, «0» на пересечении строки и столбца матрицы смежности характеризует отсутствие связи. Если ни один элемент не связан сам с собой, диагональ матрицы содержит «0» [6, 42].

Матрица в виде прямоугольной таблицы чисел очень схожа с массивом, однако прикладные задачи, которые порождают матрицы, определяют для них специальную совокупность допустимых операций, среди которых особое место занимает операция умножения.

Простейший пример ИС теплотехнологической схемы производства бумаги и картона представлен на рис. 3.17 ниже, где I – гидроразбиватели ГРВ, II – аккумулирующий массный бассейн (бассейна после ГРВ), III – вихревые очистители макулатурной массы SVS-25M, IV – бассейн грубой массы (отходов РПО).

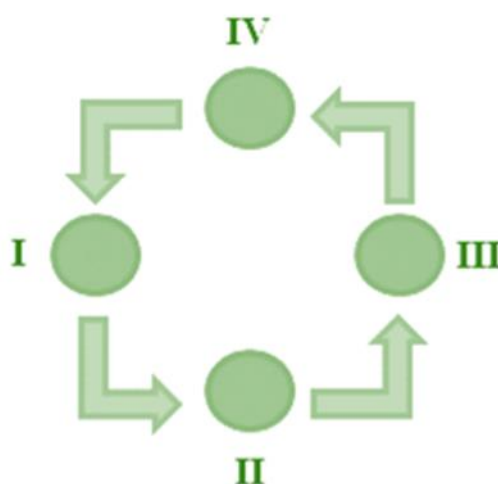


Рис. 3.17 ИС фрагмента схемы целлюлозно-бумажного производства

Исходная матрица смежности имеет вид [6]:

Таблица 3.1

Исходная матрица смежности

	I	II	III	IV
I	0	1	0	0
II	0	0	1	0
III	0	0	0	1
IV	1	0	0	0

Перемножение матрицы смежности самой на себя дает следующие результаты:

Таблица 3.2

## Первое перемножение матрицы

	I	II	III	IV
I	0	0	1	0
II	0	0	0	1
III	1	0	0	
IV	0	1	0	0

Таблица 3.3

## Второе перемножение матрицы

	I	II	III	IV
I	0	1	0	0
II	0	0	1	0
III	0	0	0	1
IV	1	0	0	0

Таблица 3.4

## Третье перемножение матрицы

	I	II	III	IV
I	1	0	0	0
II	0	1	0	0
III	0	0	1	0
IV	0	0	0	1

Как видно, на диагонали матрицы появляются единицы. Это означает, что через четыре потока все элементы схемы замыкаются в контур. Нужно отметить, что количество перемножений равняется величине, на единицу меньшую количеству элементов в схеме.

В результате работы программного обеспечения получены следующие результаты для схемы производства бумаги и картона (рис. 3.18, рис. 3.19).

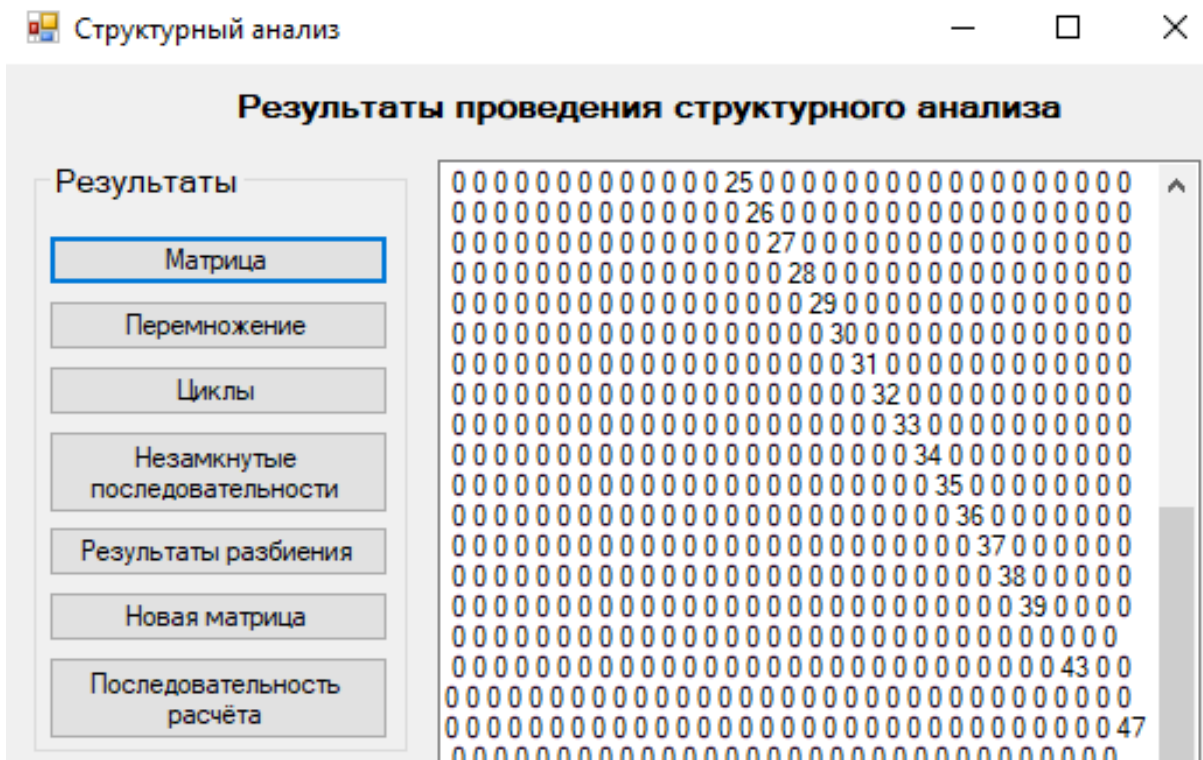


Рис. 3.18 Матрица смежности для схемы производства бумаги и картона

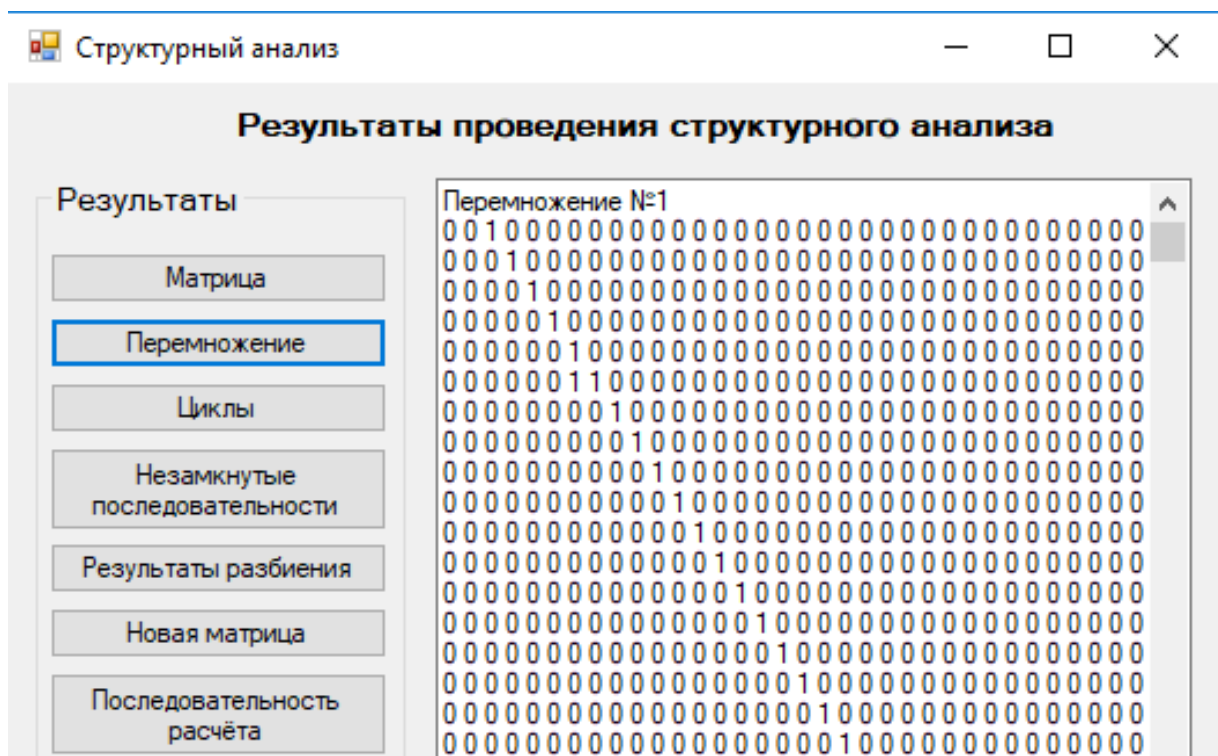


Рис. 3.19 Перемножение матрицы смежности для схемы производства бумаги и картона

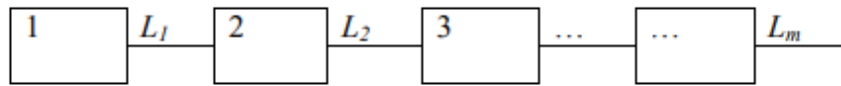


Рис. 3.20 Схематическое изображение прямой связи

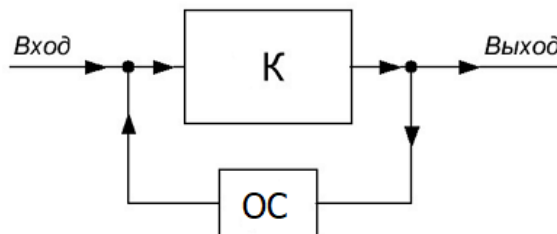


Рис. 3.21 Схематическое изображение обратной связи

Наличие в системе обратных потоков энергии и вещества означает, что в схеме имеются и замкнутые последовательности элементов (контуры). Любой контур можно рассчитать только в том случае, если предварительно условно разорвать один из его потоков, а затем провести итерационное согласование условно-входных и условно-выходных переменных, определяющих значения параметров потока. Для определения оптимальных мест разрыва контуров использован метод, основанный на использовании матрицы циклов, поскольку он более формализован и лучше приспособлен для реализации на ЭВМ [34, 38, 42]. Результаты программы по нахождению циклов представлены на рис. 3.22.

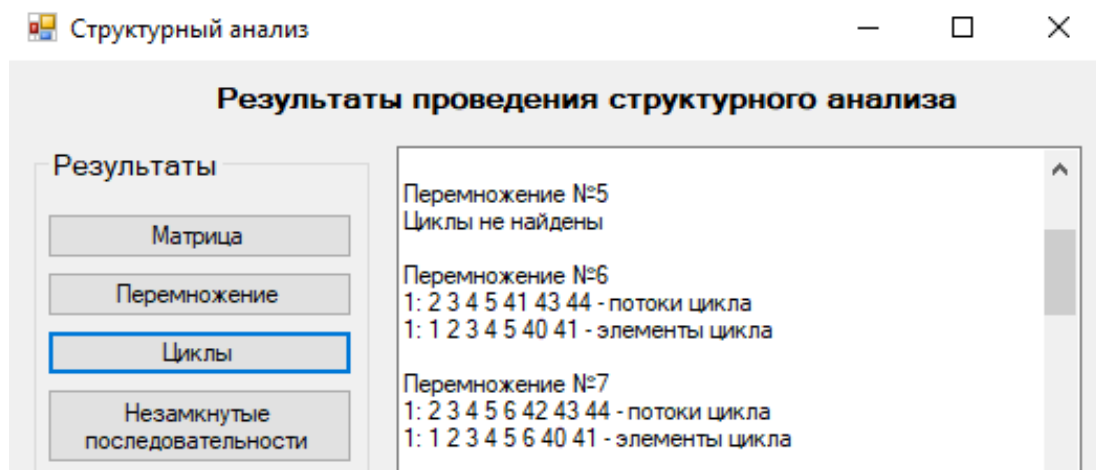


Рис. 3.22 Нахождение циклов (фрагмент)

При структурном анализе всей схемы производства бумаги ОАО «Полиграфкартон» были получены следующие результаты по определению системы контуров, которые представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Состав контуров

№ контура	Элементы, входящие в контур
1	1-2-3-4-5-40-41-1
2	1-2-3-4-5-6-40-41-1
3	1-2-3-4-5-6-7-44-1
4	7-44-45-42-7
5	42-43-45-42
6	12-13-14-15-46-12
7	12-13-14-15-47-12
8	12-13-14-12
9	20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-56-20
10	2-...-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-54-57-58-59-1
11	1-...-34-55-1
12	1-...-39-55-1
13	34-60-62-63-64-34
14	83-84-85-86-88-89-111-83
15	75-76-77-102-103-75
16	81-82-83-111-81
17	78-79-80-81-82-83-111-113-78

Для полной схемы производства бумаги выявлено минимальное количество условно разрываемых потоков, позволяющих полностью выполнить расчет схемы – 20. Это потоки с номерами: 24 (разрывает большинство циклов), 60, 113, 178, 2, 31, 128, 166, 13, 50, 68, 80, 214, 220, 229, 233, 30, 81, 199, 238.

Разрываемые потоки представлены на рис. 3.23 – 3.26.

Таким образом, алгоритм работы программного обеспечения системного анализа для теплотехнологических схем состоит из таких этапов, как поиск циклов, поиск наиболее часто встречающихся потоков, разбиение контуров условным разрывом этих потоков, выявление оптимальной последовательности и расчёт энергоэффективности системы. Программное обеспечение структурного анализа реализовано на языке программирования C# в среде разработки Visual Studio, интерфейс программного обеспечения был реализован с помощью технологии Windows Forms.





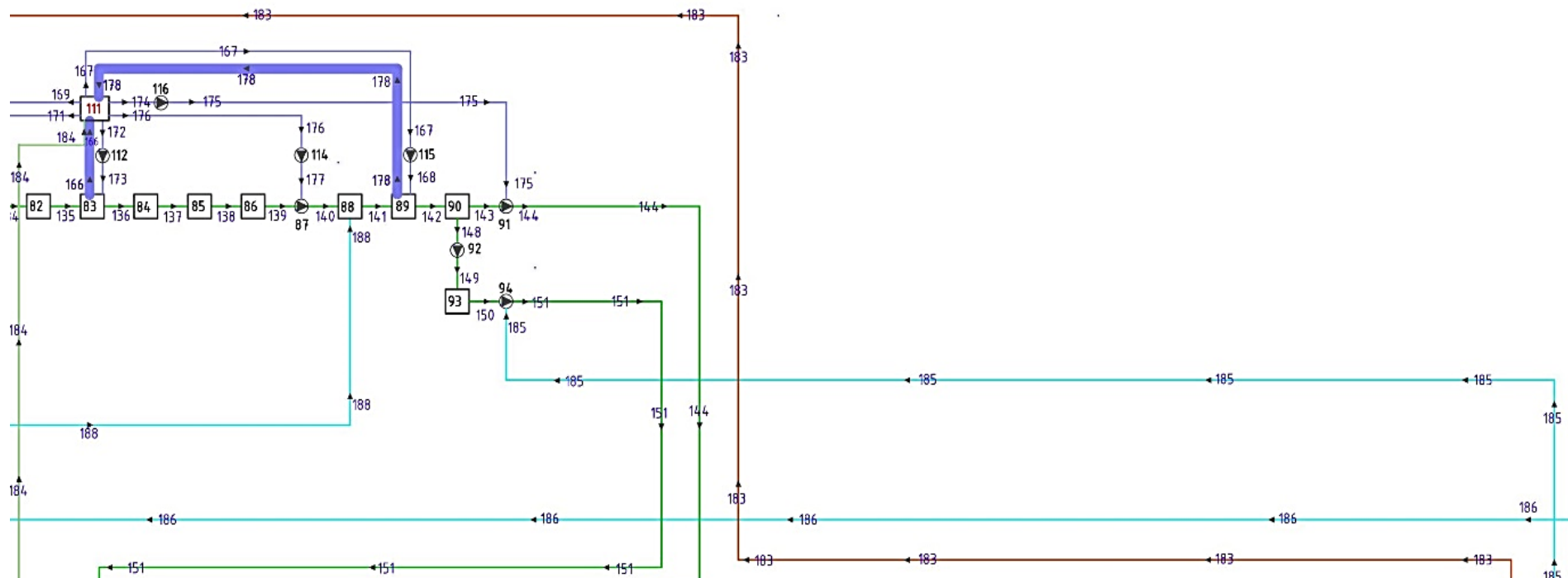


Рис. 3.24 Информационная схема производства бумаги и картона (продолжение)

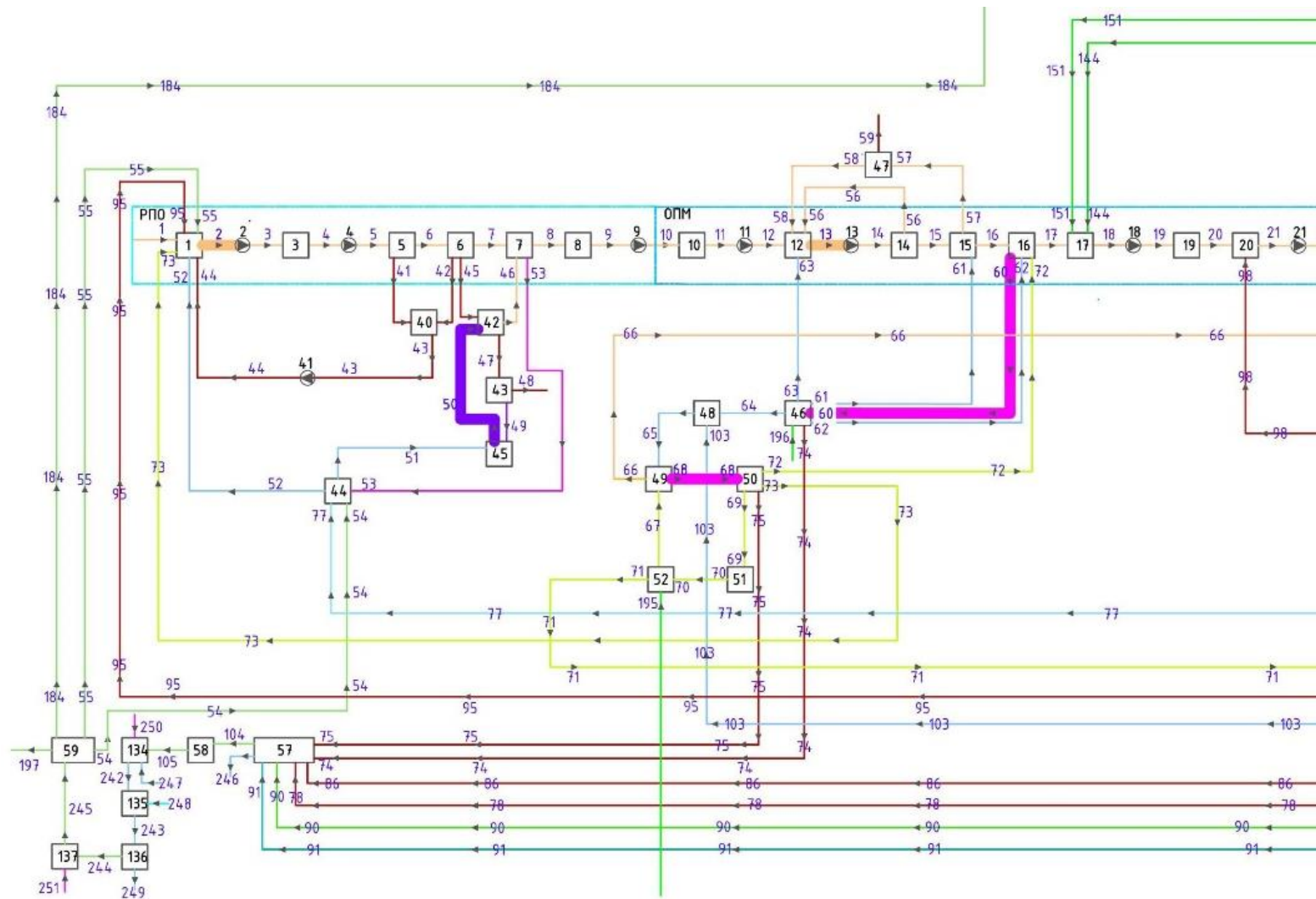


Рис. 3.25 Информационная схема производства бумаги и картона (продолжение)

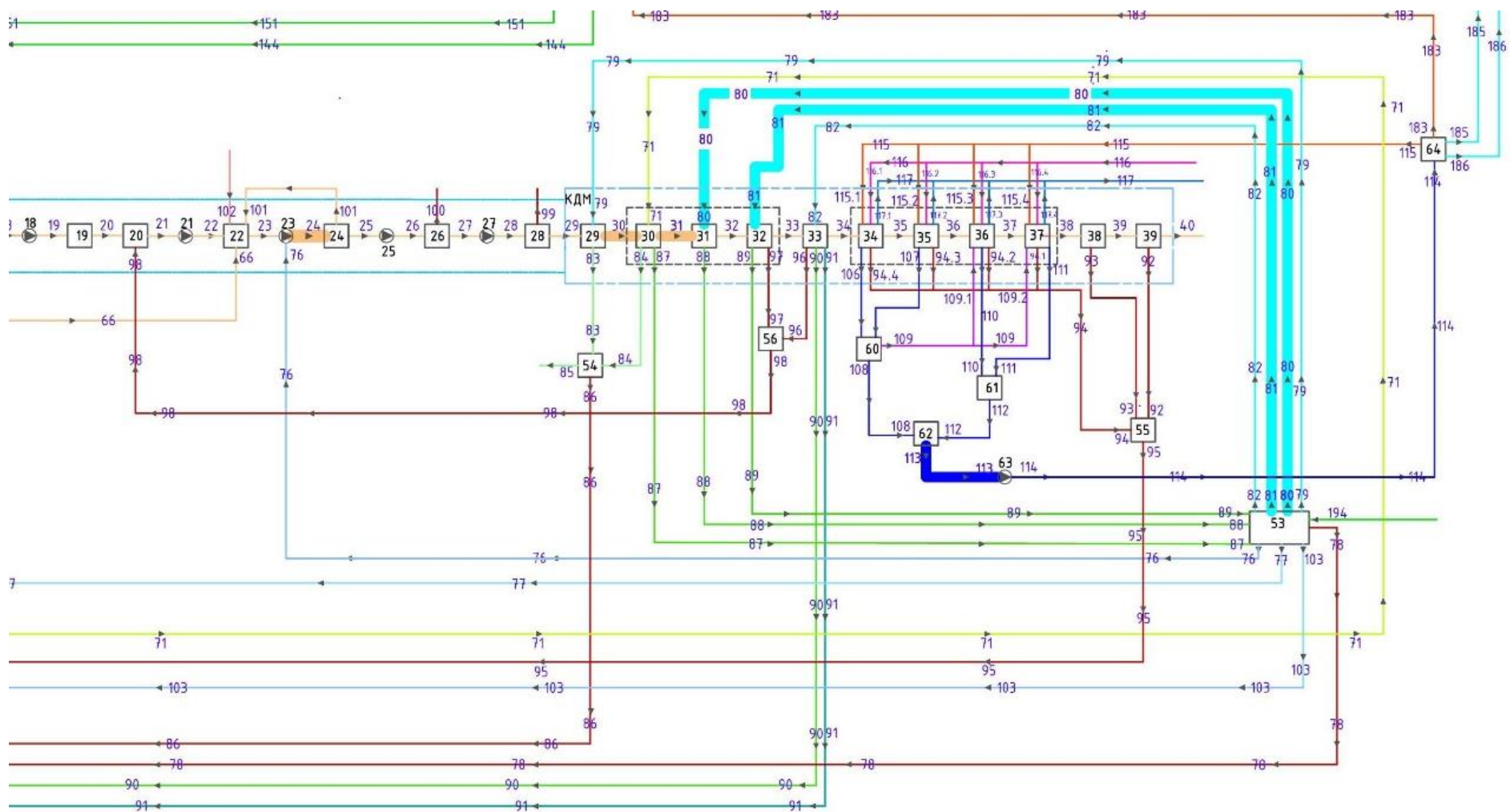


Рис. 3.26 Информационная схема производства бумаги и картона (продолжение)

## **РАЗДЕЛ 4 ЭТАП ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ**

### **4.1 Критерии оценки термодинамической эффективности систем**

Для оценки потенциала вторичной энергии 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 регенерации [6, 54 – 55].

Простейшим методом термодинамического анализа является энергетический, основанный на законе сохранения энергии. Он заключается в составлении энергетического, в частности теплового, баланса утилизационного устройства с целью определения доли полезно использованной энергии и поиска путей ее повышения. Однако этот метод имеет существенный недостаток, а именно в нем не учитывается качество, или ценность, энергии с точки зрения возможностей получения за ее счет работы. С этой точки зрения ценность некоторого количества низкотемпературного теплоносителя меньше, чем такого же количества теплоносителя с высокой температурой.

Методами термодинамического анализа, которые учитывают ценность энергии, являются энтропийный и эксергетический [56 – 58]. Оба метода дают одни и те же результаты, различие между ними носит в основном методический характер: в энтропийном методе необратимые потери энергии вычисляются непосредственно, а в эксергетическом – как разность значений эксергии на входе и выходе.

Эксергетический анализ направлен на определение степени термодинамического совершенства рабочих процессов элементов оборудования. Он позволяет выявить потери энергии от необратимости процессов для каждого элемента системы и для всей системы в целом,

произвести оценку эффективности элементов в составе системы, и, как следствие, выявить эффективный способ экономии ресурсов для рассматриваемой системы [13].

К.п.д. по эксергетическому балансу  $\eta_e$ , в общем случае [55]:

$$\eta_e = \frac{\sum E^{**}}{\sum E^*} = \frac{\sum E^* - \sum D}{\sum E^*}, \quad (4.1)$$

где  $\sum E^{**}$  – отведенная из объекта эксергия;  $\sum E^*$  – подведенная к объекту эксергия;  $\sum D$  – потери эксергии в объекте.

Недостатком этого способа является то, что если имеются транзитные потоки эксергии (не изменяющиеся при прохождении объекта), то они входят и в числитель, и в знаменатель отношения (4.1), что приводит к неоднозначности в определении к.п.д. при неизменном значении величины потерь в объекте.

Также широко применяется другой подход – разностный [54, 59]. Этот подход использован при поэлементном анализе в данной работе. Здесь, уменьшение расходуемой эксергии обозначается через  $\sum \Delta E^*$  (переданную эксергию), а увеличение получаемой эксергии через  $\sum \Delta E^{**}$  (воспринятую эксергию). В этом случае отношение для расчета эксергетического КПД имеет вид:

$$\eta_e = \frac{\sum \Delta E^{**}}{\sum \Delta E^*}. \quad (4.2)$$

Использование отношения (4.2) при расчете эксергетического к.п.д. позволяет качественнее отразить степень реализации поставленной задачи, чем при использовании отношения (4.1). Особенностью этого способа расчета к.п.д. для многоэлементных систем является неоднозначность при выборе  $\sum \Delta E^*$  и

$\sum \Delta E^{**}$ , требующая для правильной оценки степени термодинамического совершенства системы более конкретных определений в том, что считать полезными эффектами, а что затратами [5, 13].

Для установления единообразия целесообразно применять эксергетический к.п.д. только для определения термодинамических потерь эксергии в элементах схемы, а уровень использования подведенной эксергии в системе производства определять с помощью специально вводимых коэффициентов.

Третий подход при расчете эксергетического к.п.д. состоит в вычитании из числителя и знаменателя уравнения (4.1) эксергии, не претерпевшей в системе качественных изменений. Такую эксергию называют транзитной. Отношение для расчета КПД по этому методу записывается так:

$$\eta_e = \frac{\sum E^{**} - \sum E^{tr}}{\sum E^* - \sum E^{tr}}, \quad (4.3)$$

где  $\sum E^{**}$  – отведенная из системы эксергия;  $\sum E^*$  – подведенная в систему эксергия;  $\sum E^{tr}$  – эксергия, проходящая систему транзитом [60].

Среди отведенных потоков значительная часть представляет собой потоки, сбрасываемые в окружающую среду, то есть тепловые потери, которые можно полезно использовать [5]. Применение коэффициента системного использования (КСИ) [61-63] позволяет определить долю использования в системе подведенной к объекту теплоты.

$$КСИ = \frac{\sum q^{**} - \sum q_{сбр}}{\sum q^*}, \quad (4.4)$$

где  $\sum q^{**}$  – отведенная из объекта теплота;  $\sum q^*$  – подведенная к объекту теплота;  $\sum q_{сбр}$  – потери теплоты с отведенными из объекта потоками вещества.

КСИ объекта будет максимальным, когда вся отводимая от объекта теплота будет использоваться в системе.

При вычитании  $Q_{сбр}$  ( $Q_{ВЭР}$ ) находится коэффициент системного использования (КСИ). КСИ растет с увеличением  $Q'_{ВЭР}$ . Но КСИ не приблизится к к.п.д., если остался хоть 1 неиспользованный ВЭР, т.е. когда использованы все потенциальные ВЭР, КСИ все равно не приблизится к максимальному [5]. Поэтому можно случайно сделать неправильный вывод о неэффективности того или иного варианта рекуперации – возврата вторичной энергии в производство. Следовательно, предлагается при расчёте КСИ не вычитать  $Q''_{ВЭР}$  из числителя что позволит приблизить КСИ к к.п.д. при использовании всех возможных ВЭР и сделать выбор в пользу более энергоэффективного варианта утилизации [5].

При расчете  $КСИ_Q$  в состав  $\sum Q_{сбр}$  может быть включена энергия, которую принципиально невозможно использовать на рассматриваемом производстве. То есть в случае, когда на производстве все прочие вторичные потоки энергии полезно использованы,  $КСИ_Q$  не будет равным 100%. Поэтому рекомендуется вычитать из  $\sum Q_{сбр}$  составляющую  $Q_{сбр}$  для потоков с невозможностью использования на производстве. Такой подход позволит выбрать наиболее энергоэффективный вариант системы рекуперации вторичной энергии для конкретного производства.

Следовательно, формула (4.4) примет вид:

$$КСИ = \frac{\sum Q^{**} - \sum Q_{сбр}}{\sum Q^*} = \frac{(Q'_{ВЭР} + Q''_{ВЭР} + Q_{прод.}) - Q_{сбр}}{\sum Q^* - Q''_{ВЭР}}, \quad (4.5)$$

Аналогично предлагается скорректировать коэффициент системного использования эксергии  $КСИ_E$ .

## 4.2. Оценка термодинамического потенциала материальных и тепловых потоков теплотехнологической схемы производства бумаги и картона

Для расчета теплотехнологической схемы производства бумаги приняты следующие термодинамические параметры окружающей среды: температура  $T_0 = 277,5$  К или  $t = 4,5$  °С, как среднегодовая температура наружного воздуха и давление окружающей среды  $0,1013$  МПа. Влияние состава окружающей среды не учитывается, так как для решения поставленной задачи нет необходимости использовать концентрационную составляющую химической эксергии [60]. Принято, что система работает стационарно в заданном режиме.

Эксергия однородного вещества определяется по выражению:

$$\Delta e = i_1 - i_0 - T_0(s_1 - s_0). \quad (4.6)$$

Единица измерения эксергии – кДж/кг. Также возможен расчет эксергетической мощности потока (измеряется в кВт), в таком случае эксергия умножается на расход вещества.

Термомеханическая эксергия может быть определена через теплоемкости по выражению:

$$\Delta e = \int_{T_0}^{T_i} c_p dT + q_i + \int_{T_i}^{T_1} c_p dT - T_0 \left( \int_{T_0}^{T_i} c_p \frac{dT}{T} + \frac{q_i}{T_i} + \int_{T_i}^{T_1} c_p \frac{dT}{T} \right) + T_0 \left( \frac{R}{M} \ln \frac{p_1}{p_0} \right), \quad (4.7)$$

где  $i_0$  и  $s_0$  – энтальпия и энтропия рабочего вещества в состоянии, определяемом температурой  $T_0$  и давлением  $p_0$  (параметрами окружающей среды или состоянием, принятым за начало отсчета);  $i_1$  и  $s_1$  – энтальпия и энтропия рабочего вещества в заданном рабочем состоянии;  $q_i$  и  $T_i$  – тепловой эффект и температура фазового перехода;  $c_p$  – средняя в заданном интервале температур изобарная теплоемкость рабочего вещества;  $T_1$  и  $p_1$  –



соответственно температура и давление рабочего вещества;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M$  – молекулярная масса рабочего вещества [5 – 6].

Первая часть выражения (4.7),

$$\int_{T_0}^{T_i} c_p dT + q_i + \int_{T_i}^{T_1} c_p dT - T_0 \left( \int_{T_0}^{T_i} c_p \frac{dT}{T} + \frac{q_i}{T_i} + \int_{T_i}^{T_1} c_p \frac{dT}{T} \right),$$

представляет собой эксергию термическую. Последнее слагаемое в (2),  $T_0 \left( \frac{R}{M} \ln \frac{p_1}{p_0} \right)$  – деформационную или

механическую составляющую [6].

Итак, эксергию вещества в потоке определяют по формуле (4.1) для систем, в которых состав рабочего вещества не изменяется. Поэтому анализ термодинамической эффективности в таком случае построен на расчете не абсолютных значений эксергии рассматриваемого вещества, а на расчете их приращений.

В реальных системах рабочее вещество является сложным веществом, представляющим собой механическую смесь разнообразных компонентов. При определении эксергии таких веществ следует учитывать не только их температуру, давление и параметры окружающей среды, но также и концентрации компонентов этих веществ [2].

Если рабочее вещество – смесь, которую можно рассматривать как идеальную, то в этом случае эксергия вещества определяется по выражению [5 – 6]:

$$\Delta e_{см} = \Delta e + \Delta e_0, \quad (4.8)$$

где  $\Delta e$  – термомеханическая эксергия смеси при параметрах  $p_1$ ,  $T_1$  и  $\sum x_i$ ;  $\Delta e_0$  – нулевая (химическая) эксергия.

Нулевая эксергия необходима, если за начало отсчета приняты компоненты смеси при  $p_i = p_0$ . Она находится по выражению:

$$\Delta e_0 = -T_0 \Delta s_{см} = -T_0 R \sum \frac{p_i}{p_0} = -T_0 \frac{R}{M_{см}} \sum x_i \ln x_i, \quad (4.9)$$

где  $p_i$  – парциальное давление компонента в смеси;  $x_i$  – мольная доля компонента в смеси;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M_{см}$  – «кажущаяся» молекулярная масса смеси.

Для определения химической эксергии топливного газа используется корреляционные формулы [3, 5 – 6], которые выражают зависимость между нормальной химической эксергией, теплотой сгорания и числами, характеризующими химический состав:  $\frac{H}{C}; \frac{O}{C}; \frac{W}{C}; \frac{S}{C}$ . На основе этих формул предложены приближенные формулы для расчета нормальной химической эксергии вещества в технических топливах.

Химическая эксергия – это количество работы, которое можно получить в обратимом процессе установления равновесия компонентов рабочего вещества с соответствующими компонентами окружающей среды при давлении и температуре окружающей среды [2].

Нормальная химическая эксергия газообразных углеводородов определяется из выражения:

$$\frac{e_n}{Q_p^H} = 1,0344 + 0,0183 \cdot \frac{H}{C} - 0,0694 \cdot \frac{1}{C}, \quad (4.10)$$

где  $\frac{H}{C}$  – отношение атомного числа водорода к атомному числу углерода;  $C$  – среднее число атомов углерода в молекуле.

Эксергия теплового потока характеризуется количеством работы, которое можно получить или следует затратить в обратимом процессе переноса энтропии, характеризующей данный тепловой поток, на уровень температуры окружающей среды. Эксергия теплового потока учитывается в тех случаях, когда имеет место перенос тепловой энергии [2]. Для расчета эксергии теплового потока используется выражение [5 – 6]:

$$e_q = Q \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right), \quad (4.11)$$

где  $\bar{T}$  – средняя температура теплового потока;

$\tau_e = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}}\right)$  – эксергетическая температурная функция или коэффициент качества теплоты (коэффициент эксергетической ценности теплоты).

Эксергия водяного пара и воды рассчитывается по формуле для нахождения эксергии вещества в потоке, которая будет представлена в следующем виде:

$$e_T = c(t - t_0) - T_0 c \ln(T / T_0) + T_0 R \ln(1 / \varphi), \quad (4.12)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность, %.

Отдаваемая эксергия при конденсации водяного пара:

$$\Delta e = h_{\text{п}} - h_{\text{к}} - T_0 (S_{\text{п}} - S_{\text{к}}), \quad (4.13)$$

где  $h_{\text{п}}$  и  $S_{\text{п}}$  – энтальпия и энтропия пара;

$h_{\text{к}}$  и  $S_{\text{к}}$  – энтальпия и энтропия конденсата.

Атмосферный воздух содержит водяные пары, количество которых может меняться. Если для рассчитываемого процесса наличие водяных паров в атмосферном воздухе не имеет значения, то в таком случае воздух рассматривается как абсолютно сухой.

Эксергия влажного воздуха определяется по формуле [2]:

$$e_{1+X} = c_{\text{в}}(t - t_0) - T_0 \left[ c_{\text{в}} \ln \frac{T}{T_0} - R_{\text{в}} \ln \frac{p - \varphi p_s(t)}{p_0 - \varphi_0 p_0(t_0)} \right] + X [h_{\text{п}} - h_{\text{п0}} - T_0 (S_{\text{п}} - S_{\text{п0}})], \quad (4.14)$$

где  $\varphi$  и  $\varphi_0$  – относительная влажность воздуха в потоке и в окружающей среде;  $p$ ,  $p_0$  – давление воздуха в потоке и в окружающей среде;  $p_s(t)$ ,  $p_s(t_0)$  – давление насыщения водяного пара при температуре потока и окружающей среды;  $h_{\text{п}}$ ,  $S_{\text{п}}$

– энтальпия и энтропия водяного пара при параметрах потока;  $h_{\text{по}}$ ,  $S_{\text{по}}$  – энтальпия и энтропия водяного пара при параметрах окружающей среды [2].

Результаты расчета тепловой и эксергетической мощности потоков теплотехнологической схемы производства бумаги и картона приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Результаты расчета теплотехнологической схемы по потокам

№ потока	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	$\epsilon(q)$ ,кВт	$\epsilon(p)$ ,кДж/кг	$\epsilon(p)$ ,кВт
1	-	1	Макулатура	25,73	0,5	31,26	51,90
2	1	2	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	7163,10	602,83	31,26	1779,05
3	2	3	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	7165,72	603,05	54,17	3082,85
4	3	4	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	7165,72	603,05	54,17	3082,85
5	4	5	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	7168,28	603,27	71,94	4094,15
6	5	6	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	5332,73	448,79	86,46	3659,15
7	6	7	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	13610,89	1145,47	105,29	11366,25
8	7	8	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	13670,14	1150,45	105,29	11415,72
9	8	9	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	13670,14	1150,45	105,29	11415,72
10	9	10	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	13672,09	1150,62	109,37	11858,62
11	10	11	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	13672,09	1150,62	109,37	11858,62
12	11	12	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0%	13675,02	1150,86	115,13	12483,08
13	12	13	Макулатурная масса конц. 0,9%	80335,73	6760,92	115,139	73333,55
14	13	14	Макулатурная масса конц. 0,9%	73339,38	6172,12	118,75	69041,87
15	14	15	Макулатурная масса конц. 0,9%	66662,12	5610,17	115,13	60851,76
16	15	16	Макулатурная масса конц. 0,9%	63508,80	5344,80	115,13	57973,28

Продолжение таблицы 4.1

№ потока	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	ε(q),кВт	ε(p),кДж/кг	ε(p),кВт
17	16	17	Макулатурная масса конц. 5% (90%картонной массы)	14931,48	1256,61	115,13	13630,03
18	17	18	Картонная масса конц.4%	17404,77	1723,52	115,13	13630,03
19	18	19	Картонная масса	17404,54	1723,50	118,75	14058,65
20	19	20	Картонная масса	17404,77	1723,52	115,13	13630,03
21	20	21	Картонная масса	17404,77	1723,52	115,13	13630,03
22	21	22	Картонная масса конц.2,5%	17404,54	1723,50	118,75	14058,65
23	22	23	Картонная масса 2,5%	16859,80	1669,55	109,37	12545,07
24	23	24	Картонная масса 0,8%	71144,16	7045,12	118,75	57467,26
25	24	25	Картонная масса 0,8%	66806,25	6615,55	109,37	49709,31
26	25	26	Картонная масса 0,8%	66817,61	6616,67	118,75	53972,46
27	26	27	Картонная масса 0,72%	62913,02	6230,02	109,37	46812,43
28	27	28	Картонная масса 0,72%	62923,72	6231,08	118,75	50827,14
29	28	29	Картонная масса 0,71%	61850,17	6124,77	109,37	46021,58
30	29	30	Картонная масса конц. 0,7%	51071,44	5057,39	109,37	38001,32
31	30	31	Картонная масса сухость 7%	6337,60	627,58	109,37	4715,69
32	31	32	Картонная масса сухость 18%	3390,58	384,55	54,17	1095,24
33	32	33	Картонная масса сухость 23%	2567,95	291,25	54,17	829,51
34	33	34	Картонная масса сухость 43%	927,69	105,21	54,17	199,92
35	34	35	Картонная масса	1296,87	216,14	98,744	364,39
36	35	36	Картонная масса	1797,83	423,45	98,744	364,39
37	36	37	Картонная масса	1797,83	423,45	98,744	364,39
38	37	38	Картонное полотно сухость 93%	135,30	19,05	98,744	172,38
39	38	39	Картонное полотно сухость 93%	132,48	18,66	127,15	217,36
40	39		Картонное полотно сухость 93%	100,46	11,39	127,15	206,03
41	5	40	Отходы с очистителей	709,90	59,74	86,46	1320,07
42	6	40	Отходы с сепаратора	553,34	46,568	86,46	1028,95
43	40	41	Отсортированная масса	1263,24	106,31	31,26	849,32

Продолжение таблицы 4.1

№ пото ка	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	e(q),кВт	e(p),кДж/кг	e(p),кВт
44	41	1	Отсортированная масса	1263,24	106,31	71,94	1954,55
45	6	42	Отходы с сепаратора на сепараторы 2 ступени	1153,50	97,07	86,46	791,50
46	42	7	Очищенная масса после сепараторов 2 ступени	1066,26	89,73	86,46	731,64
47	42	43	Отходы с сепаратора 2 ступени	143,24	12,05	86,46	98,29
48	43		Отходы в отвал	13,21	1,11	31,26	8,88
49	43	45	Вода с волокнами макулатурной массы	107,31	9,03	31,26	26,65
50	45	42	Оборотная вода РПО	196,07	19,41	86,46	100,87
51	44	45	Оборотная вода РПО	139,90	15,86	109,37	91,14
52	44	1	Оборотная вода РПО	1093,13	123,98	141,67	921,45
53	7	44	Оборотная вода РПО (фильтрат со сгустителей)	942,95	79,35	86,46	485,90
54	59	44	Вода из пруда отстойника	1642,70	86,90	141,67	2754,72
55	59	1	Вода из пруда отстойника	1802,96	95,37	141,67	3023,46
56	14	12	Макулатурная масса конц. 2,5-3,0% (перелив)	6652,73	559,88	86,46	4569,86
57	15	47	Отходы от сортировок	1170,26	98,48	31,26	786,80
58	47	12	Макулатурная масса (очищенная)	585,13	49,24	86,46	1088,06
59	47		Отходы в отвал	585,13	49,24	31,26	393,40
60	16	46	Оборотная вода ОПМ (фильтрат со сгустителей)	45208,74	3804,69	86,46	31172,96
61	46	15	Оборотная вода ОПМ	140,05	15,884	141,67	118,05
62	46	16	Оборотная вода ОПМ	280,11	31,76	141,67	236,11
63	46	12	Оборотная вода ОПМ	65359,95	7413,02	141,67	55095,28
64	46	48	Оборотная вода ОПМ	556,43	63,11	141,67	469,05
65	48	49	Оборотная вода ОПМ	648,43	73,545	109,37	422,90
66	49	22	Волокно из оборотной воды	64,22	7,28	109,37	41,84
67	52	49	Осветленная вода (спрыски)	140,05	15,88	141,67	118,05
68	49	50	Осветленная вода	701,71	79,58	109,38	470,94
69	50	51	Осветленная вода	317,45	36,00	109,38	206,61
70	51	52	Осветленная вода	317,45	36,00	109,38	206,61

Продолжение таблицы 4.1

№ пото ка	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	e(q),кВт	e(p),кДж/кг	e(p),кВт
71	52	30	Осветленная вода (спрыски)	140,05	15,88	109,38	91,15
72	50	16	Осветленная вода	280,11	31,76	109,38	182,30
73	50	1	Осветленная вода	37,34	4,23	109,38	24,31
74	46	57	Сточная вода (оборотная)	413,94	34,83	141,67	464,37
75	50	57	Сточная вода (осветленная)	59,63	5,01	109,38	51,65
76	53	23	Оборотная вода КДМ	506,48	57,44	109,38	329,63
77	53	44	Оборотная вода КДМ	233,42	26,47	109,38	151,92
78	53	57	Сточная вода (оборотная)	310,82	26,15	109,38	269,21
79	53	29	Оборотная вода	70,02	7,94	109,38	45,57
80	53	31	Оборотная вода	233,42	26,47	109,38	151,92
81	53	32	Оборотная вода	473,85	53,74	109,38	308,39
82	53	33	Оборотная вода	2334,25	264,74	109,38	1519,16
83	29	54	Оборотная вода	9349,12	925,80	109,38	6090,93
84	30	54	Оборотная вода	41527,35	4709,97	109,38	27054,97
85	54		Оборотная вода	27748,32	3147,13	109,38	18077,96
86	54	57	Оборотная вода (перелив)	20280,34	1706,76	31,26	5036,91
87	30	53	Оборотная вода	1165,89	115,45	109,38	759,58
88	31	53	Оборотная вода	2351,73	266,73	109,38	1532,15
89	32	53	Оборотная вода	806,39	91,46	109,38	525,37
90	33	57	Сточная вода (оборотная)	700,65	58,96	109,38	607,72
91	33	57	Сточная вода (оборотная)	758,54	63,83	109,38	657,93
92	39	55	Картонное полотно сухость 93% (брак)	1,80	0,20	109,38	3,19
93	38	55	Картонное полотно сухость 93% (брак)	1,88	0,26	109,38	2,66
94	34,3 5,36 ,37	55	Картонное полотно сухость 93% (брак)	2926,13	689,21	109,38	30,38
95	55	1	Картонное полотно сухость 93% (брак)	4396,99	498,70	109,38	30,38
96	33	56	Картонное полотно сухость 30% (брак)	864,22	98,01	31,26	176,00
97	32	56	Картонное полотно сухость 22% (брак)+отсечки	8,89	1,01	109,38	1524,65
98	56	20	Картонное полотно (брак )	700,90	79,49	109,38	15,70

Продолжение таблицы 4.1

№ пото ка	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	e(q),кВт	e(p),кДж/кг	e(p),кВт
99	28		Отходы 3,5%(волокнистая масса 1,5%)	392,24	38,84	109,38	1236,52
100	26		Отходы	1436,79	142,28	109,38	790,85
101	24	22	Картонная масса 0,8% (перелив)	4319,22	427,71	31,26	920,01
102	22		Химикаты (клей,крахмал)	18,20	0,96	0,00	0,00
103	53	48	Оборотная вода КДМ	93,37	10,59	141,67	78,71
104	57	58	Оборотная вода (сточная вода)	18163,98	960,89	31,26	6721,80
105	58	59	Оборотная вода (пруды отстойники)	18163,98	960,89	141,67	30459,96
106	34	60	Конденсат	455,30	147,14	94,54	74,69
107	35	60	Конденсат	455,30	147,14	94,54	74,69
108	60	62	Конденсат	352,20	113,82	94,54	57,77
109	60	36,3 7	Пары вскипания	545,96	176,44	93,82	18,76
110	36	61	Конденсат	1415,86	457,56	94,54	232,25
111	37	61	Конденсат	3121,80	1008,88	94,54	512,09
112	61	62	Конденсат	4278,31	1382,63	94,54	701,80
113	62	63	Конденсат	4113,10	1329,23	94,54	674,70
114	63	64	Конденсат	4113,10	1329,23	94,54	674,70
115	64	34,3 5, 36,3 7	Пар	3504,88	1140,75	97,60	146,72
116		34,3 5, 36,3 7	Теплый воздух	3504,44	965,32	86,47	2741,02
117	34,3 5, 36,3 7		Отработанный влажный воздух	2991,85	666,25	86,47	2741,02
118		65	Древесина	259,97	5,05	0,00	0,00
119	65	66	Щепа	259,97	13,75	0,00	0,00
120	66	67	Щепа	251,44	13,30	0,00	0,00
121	67	68	Щепа	251,44	13,30	0,00	0,00
122	68	70	Щепа	194,61	10,30	0,00	0,00
123	70	71	Щепа	194,61	10,30	0,00	0,00
124	71	72	Щепа	194,61	10,30	0,00	0,00
125	72	73	Щепа	194,61	10,30	0,00	0,00
126	73	74	Щепа	194,61	10,30	0,00	0,00



Продолжение таблицы 4.1

№ пото ка	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	e(q),кВт	e(p),кДж/кг	e(p),кВт
127	74	75	Щепа	583,83	49,13	0,00	0,00
128	75	76	Щепа	413,33	34,79	0,00	0,00
129	76	77	Щепа	335,83	28,26	0,00	0,00
130	77	78	Полуцеллюлоза 10%	2980,44	875,93	153,95	357,67
131	78	79	Полуцеллюлоза 10%	2805,02	824,38	153,95	481,63
132	79	80	Полуцеллюлоза 10%	2657,62	625,97	109,38	608,93
133	80	81	Полуцеллюлоза 10%	2657,62	625,97	109,38	608,93
134	81	82	Полуцеллюлоза 4%	1231,32	235,14	141,67	594,39
135	82	83	Полуцеллюлоза 4%	1231,32	235,14	141,67	594,39
136	83	84	Полуцеллюлоза 10%	718,20	81,46	86,47	370,09
137	84	85	Полуцеллюлоза 10%	718,20	81,46	86,47	370,09
138	85	86	Полуцеллюлоза	999,45	113,36	141,67	842,49
139	86	87	Полуцеллюлоза	1046,13	118,65	141,67	881,84
140	87	88	Полуцеллюлоза 3,5%	3175,87	360,20	141,67	2677,11
141	88	89	Полуцеллюлоза 3%	3705,19	420,24	109,38	2411,38
142	89	90	Полуцеллюлоза 2,8%	3835,09	434,97	71,95	1644,79
143	90	91	Полуцеллюлоза 2,8%	562,92	63,85	71,95	241,43
144	91	17	Полуцеллюлоза 2,8%	635,70	72,10	109,38	370,07
145	66		Отходы от щепы	6,17	0,33	0,00	0,00
146	68	69	Крупная щепа+отходы	41,16	2,18	0,00	0,00
147	69		Крупная щепа+отходы	41,16	2,18	0,00	0,00
148	90	92	Полуцеллюлоза	3269,39	370,81	71,95	1402,17
149	92	93	Полуцеллюлоза 2,8%	3270,25	370,91	86,47	1685,16
150	93	94	Полуцеллюлоза 2,8%	3270,25	275,22	86,47	1685,16
151	94	17	Полуцеллюлоза 2,8%	3661,77	466,36	109,38	2131,69
152	75	106	Отходы (крупные примеси)	609,49	32,24	0,00	0,00
153	106		Отходы	620,00	32,80	0,00	0,00
154	76	102	Вода	52,76	5,98	0,00	0,00
155	102	104	Вода (перелив грязной воды)	52,76	5,98	0,00	0,00
156	104	106	Отходы (опилки)	47,01	2,49	0,00	0,00
157	102	105	Песок	20,39	1,08	0,00	0,00
158	105	106	Песок	20,39	1,08	0,00	0,00
159	102	103	Вода	372,89	42,29	86,47	192,15
160	103	75	Вода	373,48	42,36	141,67	314,83

Продолжение таблицы 4.1

№ пото ка	Из апп.	В апп.	Вещество	Q,кВт	e(q),кВт	e(p),кДж/кг	e(p),кВт
161	77	102	Влага (избыток влаги из вар.апп-та)	349,50	58,25	86,47	120,09
162	78	95	Пары вскипания	141,56	36,24	71,95	3,81
163	95	96	Горячая вода	93,16	19,93	141,67	39,35
164	96	107	Горячая вода	93,16	19,93	141,67	39,35
165	107	102	Горячая вода	93,16	19,93	141,67	39,35
166	83	111	Вода (отработанный раствор)	7325,51	1220,92	127,15	3705,03
167	111	115	Вода	171,24	16,96	127,15	129,62
168	115	89	Вода	171,33	19,43	141,67	144,43
169	111	113	Вода	23,33	2,31	127,15	17,66
170	113	78	Вода	23,34	2,65	141,67	19,68
171	111	81	Вода (отработанный раствор)	49,57	4,91	127,15	37,52
172	111	112	Вода	476,13	47,15	127,15	360,41
173	112	83	Вода	7712,55	1285,43	141,67	6501,31
174	111	116	Вода	116,65	11,55	127,15	88,30
175	116	91	Вода	116,71	13,24	141,67	98,38
176	111	114	Вода	11908,40	1179,24	127,15	11924,62
177	114	87	Вода	15761,76	1787,68	141,67	13286,40
178	89	111	Вода (отработанный раствор)	37,35	4,24	141,67	31,48
179	97	75	Оборотная вода	129,07	6,83	86,47	132,10
180	108	109	Варочный раствор	1546,09	577,60	141,67	78,71
181	109	110	Варочный раствор	1541,86	576,02	153,95	85,53
182	110	77	Варочный раствор	1539,81	575,26	159,44	88,58
183	64	77	Пар на пропарку щепы	1553,34	642,03	214,65	119,25
184	59	111	Оборотная вода (с прудов отстойников)	9386,89	496,58	141,67	15741,28
185	64	94	Вода (свежая вода)	163,40	18,53	141,67	137,74
186	64	101	Вода (свежая вода)	560,22	63,54	141,67	472,24
187	101	100	Вода (свежая вода)	559,93	63,51	127,15	423,84
188	100	88	Вода (свежая вода)	529,31	60,03	141,67	446,18
189	100	99	Вода (свежая вода)	217,65	24,69	141,67	183,47
190	99	97	Вода (свежая вода)	217,65	24,69	141,67	183,47
191	97	98	Вода (свежая вода)	54,22	6,15	127,15	41,04
192	98	95	Вода (свежая вода)	54,25	6,15	127,15	41,04
193	95	-	Летучие вещества	102,52	11,63	71,95	43,97

### 4.3 Построение тепловых и эксергетических балансов блоков теплотехнологической схемы производства бумаги и картона

#### Блок №1 (размольно-подготовительный отдел)

Тепловая и эксергетическая части анализа и оценки выполнены для каждого рассматриваемого элемента и блока теплотехнологической схемы.

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №1 (размольно-подготовительный отдел) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.2 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.2в.

Таблица 4.2а

#### Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №1 (РПО-размольно-подготовительный отдел)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Превращение сырья (макулатуры) в волокнистую суспензию в гидроразбавителе 1				
1, 44, 52, 55, 73, 95	7915,39	752,29	752,29	-
2	7163,10			
Очищение массы от тяжелых загрязнений и песка в вихревом очистителе 5				
5	7168,28	1125,64	1125,64	-
6,41	6042,63			
Очищение в сепараторе 6				
6	5332,73	9985,01	9985,01	-
7,42,45	15317,75			
Стустиль 7				
7, 46	14677,16	64,06	64,06	99,56
8, 53	14613,09			

Тепловой и эксергетические КПД элементов 1, 5 и 6 не были рассчитаны, так как это не теплообменные аппараты, изменения температур не происходит. Эксергетический КПД элемента 7, определенный по формуле (1.4) составляет 99,5%. Как видно из результатов, эксергетический к.п.д. равен

тепловому к.п.д. из-за постоянства температур потоков на входе и выходе из элемента.

Таблица 4.2б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №1 (РПО-размольно-подготовительный отдел)

№ 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, %
Превращение сырья (макулатуры) в волокнистую суспензию в гидроразбавителе 1				
1, 44, 52, 55, 73, 95	791,86	189,03	189,03	-
2	602,83			
Очищение массы от тяжелых загрязнений и песка в вихревом очистителе 5				
5	603,27	94,73	94,73	-
6,41	508,53			
Очищение в сепараторе 6				
6	448,79	840,32	840,32	-
7,42,45	1289,11			
Сгуститель 7				
7, 46	1235,20	5,390	5,391	99,5634776
8, 53	1229,81			

Таблица 4.2в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов блока №1

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Эксергия потока, кВт	Изменение эксергии потока в элементе, кВт	Эксергетический КПД, %
Превращение сырья (макулатуры) в волокнистую суспензию в гидроразбавителе 1			
1, 44, 52, 55, 73, 95	7811,32	5429,42	-
2	2381,89		
Очищение массы от тяжелых загрязнений и песка в вихревом очистителе 5			
5	4697,42	790,34	-
6,41	5487,76		
Очищение в сепараторе 6			
6	4107,95	10367,87	-
7,42,45	14475,82		
Сгуститель 7			
7, 46	14556,01	1424,56	90,21
8, 53	13131,44		

## Блок №2 (отдел подготовки массы)

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №2 (ОПМ-отдел подготовки массы) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.3 (а, б).

Таблица 4.3а

### Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №2 (ОПМ-отдел подготовки массы)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Разбавление сырья оборотной водой в массном канале 12				
12, 56,58,63	86272,84	5937,11	5937,11	93,11
13	80335,73			
Напорный ящик ОПМ 14				
14	73339,38	24,52	24,52	99,96
15,56	73314,86			
Сортировка массы в СЦ 15				
15,61	66802,18	2123,11	2123,11	96,82
16,57	64679,06			
Сгущение массы в сгустителе 16				
16, 62, 72	64069,02	3928,79	3928,79	93,86
17, 60	60140,23			
Бассейн сгущенной массы ОПМ 17				
17,144,151	19228,95	1824,17	1824,17	-
18	17404,77			
Композиционный бассейн КДМ 20				
20,98	18105,67	700,90	700,90	96,12
21	17404,77			
Машинный бассейн 22				
22,66,101,102	21806,18	9438,01	9438,01	77,31
23	12368,17			
Бак постоянного уровня КДМ (переливной бак) 24				
24	71144,16	18,68	18,68	-
25,101	71125,47			
Очистка от тяжелых включений УВК 26				
26	66817,61	2467,79	2467,79	-
27, 100	64349,82			
Улавливание пучков и узелков в узлоловителях 28				
28	62923,72	681,30	681,30	-
29,99	62242,422			

Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.3в.

Таблица 4.3б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №2 (ОПМ-отдел подготовки массы)

№ 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, %
Разбавление сырья оборотной водой в массном канале 12				
12, 56,58,63	9173,02	2412,09	2412,09	73,70
13	6760,92			
Напорный ящик ОПМ 14				
14	6172,12	2,06	2,06	99,96
15,56	6170,06			
Сортировка массы в СЦ 15				
15,61	5626,06	182,77	182,77	96,75
16,57	5443,28			
Сгущение массы в сгустителе 16				
16, 62, 72	5408,33	347,03	347,03	93,58
17, 60	5061,30			
Бассейн сгущенной массы ОПМ 17				
17,144,151	1744,02	20,49	20,49	-
18	1723,52			
Композиционный бассейн КДМ 20				
20,98	1803,02	79,49	79,49	95,59
21	1723,52			
Машинный бассейн 22				
22,66,101,102	2159,46	934,69	934,69	77,313
23	1224,77			
Бак постоянного уровня КДМ (переливной бак) 24				
24	7045,12	1,85	1,85	-
25,101	7043,26			
Очистка от тяжелых включений УВК 26				
26	6616,67	244,37	244,37	-
27, 100	6372,30			
Улавливание пучков и узелков в узлоловителях 28				
28	6231,083503	67,46	67,46	-
29,99	6163,61			

Таблица 4.3в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок

## №1 (РПО-размольно-подготовительный отдел)

№ 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, %
Разбавление сырья оборотной водой в массном канале 12				
12, 56,58,63	82409,32	2314,84	2314,84	97,19
13	80094,48			
Напорный ящик ОПМ 14				
14	75214,00	3622,31	3622,31	95,18
15,56	71591,69			
Сортировка массы в СЦ 15				
15,61	66595,88	2392,50	2392,50	96,40
16,57	64203,38			
Сгущение массы в сгустителе 16				
16, 62, 72	63853,86	13989,55	13989,55	78,09
17, 60	49864,30			
Бассейн сгущенной массы ОПМ 17				
17,144,151	17875,82	2522,25	2522,25	-
18	15353,56			
Композиционный бассейн КДМ 20				
20,98	16669,57	1316,01	1316,012	92,10
21	15353,56			
Машинный бассейн 22				
22,66,101,102	17179,97	6752,27	6752,27	82,74
23	10427,70			
Бак постоянного уровня КДМ (переливной бак) 24				
24	64512,38	6839,79	6839,79	-
25,101	57672,59			
Очистка от тяжелых включений УВК 26				
26	60589,14	4507,52	4507,52	-
27, 100	56081,61			
Улавливание пучков и узелков в узлоловителях 28				
28	57058,22	4082,17	4082,17	-
29,99	52976,05			

Тепловой и эксергетические к.п.д.элементов 17, 24, 26 и 28 не были рассчитаны, так как это не теплообменные аппараты, изменения температур не происходит. Наименьший эксергетический к.п.д. блока,

определенный по формуле (4.4) составляет 73,4 %, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.

### **Блок №3 (картоноделательная машина)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №3 (КДМ) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.4 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.4в.

Тепловой и эксергетические к.п.д. элементов 31, 38 и 39 не были рассчитаны, так как это не теплообменные аппараты, изменения температур не происходит. Наименьший эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.4) составляет 46,89 % при сушке в 4 группе цилиндров сушильной части 37, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.

### **Блок №4 (отходы и вода размольно-подготовительного отдела)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №4 (отходы и вода РПО) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.5 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.5в.

Тепловой и эксергетический к.п.д. элементов 43 и 44 не были рассчитаны, так как это не теплообменные аппараты, изменения температур не происходит.

Наименьший эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.4) составляет 77,9 %, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.



Таблица 4.4а

## Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №3 (КДМ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та		Теплота потока, кВт		Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Напорный ящик КДМ 29						
29, 79		61920,20		1499,63	1499,63	97,57
30, 83		60420,56				
Участок предварительного обезвоживания 30						
30, 71		51211,49		2180,64	2180,64	95,74
31, 84, 87		49030,85				
Удаление воды в отсасывающем ящике 31						
31, 80		6571,03		828,71	828,71	-
32, 88		5742,31				
Удаление воды в гауч-вале 32						
32, 81		3864,43		481,18	481,18	87,54
33, 89, 97		3383,25				
Обезвоживание и уплотнение в прессовой части КДМ 33						
33, 82		4902,20		1651,08	1651,08	66,31
34, 90, 91, 96		3251,11				
Сушка в 1 группе цилиндров сушильной части 34						
115.1, 116.1	106, 117.1	7009,31	3447,14	3562,16	266,85	92,508635
34	35, 94.4	927,69	4223,00	3295,31		
Сушка в 2 группе цилиндров сушильной части 35						
115.2, 116.2	107, 117.2	7009,31	3447,149	3562,169	135,07	96,20
35	36, 94.3	1296,87	4723,97	3427,09		
Сушка в 3 группе цилиндров сушильной части 36						
115.3, 116.3, 109.1	110, 117.3	7555,28	4407,70	3147,57	221,44	92,96
36	37, 94.2	1797,83	4723,97	2926,13		
Сушка в 4 группе цилиндров сушильной части 37						
115.4, 116.4, 109.2	111, 117.4	7555,28	6113,64	1441,63	178,03	87,65
37	38, 94.1	1797,83	3061,43	1263,59		
Улучшение поверхности в машинном каландре и намотка в периферическом накате 38						
38		135,30		0,93	0,93	-
39, 93		134,36				
Продольнорезательный станок 39						
39		132,48		30,21	30,21	-
40, 92		102,27				

Таблица 4.4б

## Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №3 (КДМ)

№ 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	
30, 83		5983,20							
Участок предварительного обезвоживания 30									
30, 71		5073,28		217,9559062		217,95		95,70	
31, 84, 87		4855,32							
Удаление воды в отсасывающем ящике 31									
31, 80		654,06		2,77		2,77		-	
32, 88		651,28							
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		556,00		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						
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						
Сушка в 3 группе цилиндров сушильной части 36									
115.3, 116.3, 109.1	110, 117.3	2282,50	1123,81	1158,69		469,47		59,48	
36	37, 94.2	423,45	1112,67						
Сушка в 4 группе цилиндров сушильной части 37									
115.4, 116.4, 109.2	111, 117.4	2282,50	1675,12	607,38		322,56		46,89	
37	38, 94.1	423,45	708,27						
Улучшение поверхности в машинном каландре и намотка в периферическом накате 38									
38		19,05		0,13		0,13		-	
39, 93		18,92							
Продольнорезающий станок 39									
39		18,66		7,06		7,06		-	
40, 92		11,59							

Таблица 4.4в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок

## №3 (КДМ)

№ 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		52213,33		2137,86	2137,86	95,90
30, 83		50075,46				
Участок предварительного обезвоживания 30						
30, 71		43192,66		5807,09	5807,09	86,55
31, 84, 87		37385,57				
Удаление воды в отсасывающем ящике 31						
31, 80		5566,52		2287,84	2287,84	-
32, 88		3278,67				
Удаление воды в гауч-вале 32						
32, 81		1932,98		178,67	178,67	90,75
33, 89, 97		1754,30				
Обезвоживание и уплотнение в прессовой части КДМ 33						
33, 82		3353,17		36,913	36,91	98,89
34, 90, 91, 96		3316,26				
Сушка в 1 группе цилиндров сушильной части 34						
115.1, 116.1	106, 117	4993,81	3629,1	1364,71	369,71	72,90
34	35, 94.4	305,13	1300,13	994,9		
Сушка в 2 группе цилиндров сушильной части 35						
115.2, 116.2	107, 117.2	4993,81	3629,1	1364,71	125,31	90,81
35	36, 94.3	268,048	1507,44	1239,39		
Сушка в 3 группе цилиндров сушильной части 36						
115.3, 116.3, 109.1	110, 117.3	2906,50	4097,08	1190,580	47,52	96,0
36	37, 94.2	364,39	1507,44	1143,054189		
Сушка в 4 группе цилиндров сушильной части 37						
115.4, 116.4, 109.2	111, 117.4	5189,01	4928,23	260,77	137,58	47,24
37	38, 94.1	787,85	911,04	123,19		
Улучшение поверхности в машинном каландре и намотка в периферическом накате 38						
38		191,44		47,49	47,49	-
39, 93		238,94				
Продольнорезательный станок 39						
39		236,02		15,20	15,20	-
40, 92		220,82				

Таблица 4.5а

Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №4  
(отходы и вода РПО)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Сепаратор 42				
45, 50	1349,58	140,07	140,07	89,62
46,47	1209,51			
Вибросортировка 43				
47	143,24	22,71	22,71	-
48, 49	120,53			
БПУ воды РПО 45				
49, 51	247,22	51,14		79,31
50	196,07			
Бассейн оборотной воды РПО 44				
53, 54, 77	1528,38	295,35	295,35	-
51, 52	1233,03			

Таблица 4.5б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №4 (отходы и вода РПО)

№ 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, %
Сепаратор 42				
45, 50	116,49	14,70	14,70	87,37
46,47	101,79			
Вибросортировка 43				
47	12,05	1,91	1,91	-
48, 49	10,14			
БПУ воды РПО 45				
49, 51	24,89	5,48	5,48	77,97
50	19,41			
Бассейн оборотной воды РПО 44				
53, 54, 77	124,45	15,39	15,39	-
51, 52	139,84			

Таблица 4.5в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
№4 (Отходы и вода РПО)

№ 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, %
Сепаратор 42				
45, 50	1008,87	77,15	77,15	92,35
46,47	931,72			
Вибросортировка 43				
47	110,34	64,66	64,66	-
48, 49	45,68			
БПУ воды РПО 45				
49, 51	142,70	22,40	22,40	84,29
50	120,29			
Бассейн оборотной воды РПО 44				
53, 54, 77	1397,42	244,96	244,96	-
51, 52	1152,45			

**Блок №5 (отходы и вода отдела подготовки массы)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №5 (отходы и вода ОПМ) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.6 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.6в.

Тепловой и эксергетические к.п.д. элемента 46 не были рассчитаны, так как это не теплообменник, изменение температур не происходит. Наименьший эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.4) составляет 88,23 % в бассейне осветленной воды 52, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.

Таблица 4.6а

Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №3 (отходы и вода ОПМ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та		Теплота потока, кВт		Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Бассейн оборотной воды ОПМ 46						
60		45208,74		21541,75	-	-
61, 62, 63, 64, 74		66750,50				
Очистка избыточной воды в напорном баке дискового фильтра 48						
64, 103		649,80		1,36	1,36	99,78
65		648,43				
Улавливание волокна в дисковом фильтрате 49						
65	66	648,43	64,22	584,21	22,55	96,13
67	68	140,05	701,71			
Бассейн осветленной воды ОПМ 50						
68		701,71		7,15	7,15	98,97
69, 72, 73, 75		694,55				
Бассейн осветленной воды 52						
70		317,45		37,34	37,34	88,23
67, 71		280,11				

Таблица 4.6б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №5 (отходы и вода ОПМ)

№ 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, %
Бассейн оборотной воды ОПМ 46						
60		3804,69		3753,93	3753,93	-
61, 62, 63, 64, 74		7558,63				
Очистка избыточной воды в напорном баке дискового фильтра 48						
64, 103		73,70		0,15	0,15	99,78
65		73,54				
Улавливание волокна в дисковом фильтрате 49						
65	66	73,54	7,28	66,26	2,55	96,13
67	68	15,88	79,58			
Бассейн осветленной воды ОПМ 50						
68		79,58		2,55	2,55	96,78
69, 72, 73, 75		77,03				
Бассейн осветленной воды 52						
70		36,01		4,23	4,23	88,23
67, 71		31,76				

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
№5 (отходы и вода ОПМ)

№ 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, %
Бассейн оборотной воды ОПМ 46				
60	34977,65	28963,85	28963,85	-
61, 62, 63, 64, 74	63941,51			
Очистка избыточной воды в напорном баке дискового фильтра 48				
64, 103	621,45	125,01	125,01	79,88
65	496,44			
Улавливание волокна в дисковом фильтрате 49				
65	496,44	49,12	30,73	95,12
66	496,44	447,31		
67	133,94	550,52	416,58	
Бассейн осветленной воды ОПМ 50				
68	550,52	8,63	8,63	98,43
69, 72, 73, 75	541,89			
Бассейн осветленной воды 52				
70	242,61	1,63	1,63	99,32
67, 71	240,97			

**Блок №6 (отходы и вода картоноделательной машины)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №6 (отходы и вода КДМ) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 2.7 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 2.7в.

Тепловой и эксергетический к.п.д. элемента 55 не были рассчитаны, так как это не теплообменник, изменение температур не происходит. Наименьший эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.4) составляет 50,69 % в очистных сооружениях, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.

Таблица 2.7а

## Результаты теплового расчета блока №6 (отходы и вода КДМ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Бассейн подсеточной воды КДМ 54				
83, 84	50876,47	2847,81	2847,81	94,40
85, 86	48028,66			
Бассейн сухого брака 55				
92, 93, 94	152120,37	147723,38	147723,38	-
95	4396,99			
Бассейн мокрого брака 56				
96, 97	873,12	172,22	172,22	80,27
98	700,90			
Очистные сооружения (канализация) 57				
74, 75, 78, 86, 90, 91	22523,94	4359,96	4359,96	80,64
104	18163,97			
Очистные сооружения после ПО 59				
105	18163,97	5331,41	5331,41	70,64
54, 55, 184	12832,55			

Таблица 4.7б

## Результаты эксергетического расчета блока №6 (отходы и вода КДМ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Эксергия потока, кВт	Изменение эксергии потока в элементе, кВт	Потери эксергии в эл-те, кВт	Эксергетический КПД, %
Бассейн подсеточной воды КДМ 54				
83, 84	5635,09	781,15	781,15	86,12
85, 86	4853,93			
Бассейн сухого брака 55				
92, 93, 94	689,68	190,98	190,98	-
95	498,70			
Бассейн мокрого брака 56				
96, 97	99,02	19,53	19,53	80,27
98	79,49			
Очистные сооружения (канализация) 57				
74, 75, 78, 86, 90, 91	1895,57	934,68	934,68	50,69
104	960,89			
Очистные сооружения после ПО 59				
105	960,83	282,03	282,03	70,64
54, 55, 184	678,85			



Результаты суммарного эксергетического расчета блока №6 (отходы и вода  
КДМ)

№ 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, %
Бассейн подсеточной воды КДМ 54				
83, 84	38183,99	10215,18	10215,18	73,24
85, 86	27968,80			
Бассейн сухого брака 55				
92, 93, 94	725,91	51,21	51,21	-
95	674,70			
Бассейн мокрого брака 56				
96, 97	1639,37	323,36	323,36	73,24
98	1316,01			
Очистные сооружения (канализация) 57				
74, 75, 78, 86, 90, 91	8983,36	1300,67	1300,67	85,52
104	7682,69			
Очистные сооружения после ПО 59				
105	31420,85	9222,52	9222,52	70,64
54, 55, 184	22198,32			

**Блок №7 (конденсат картоноделательной машины)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №7 (конденсат КДМ) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.8 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.8в.

Тепловой и эксергетический к.п.д. элементов одинаковые из-за постоянства температур потоков на входе и выходе из элементов. Суммарный эксергетический к.п.д. элемента 60 ниже эксергетического КПД по тепловой составляющей из-за отсутствия «полезности» составляющей по давлению в данном элементе.

Таблица 4.8а

## Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №7

(конденсат КДМ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Бак для конденсата 60				
106, 107	910,60	12,43	12,43	98,63
108,109	898,16			
Бак для конденсата 61				
110, 111	4537,66	259,34	259,34	94,28
112	4278,31			
Бак для конденсата 62				
108, 112	4630,51	517,41	517,41	88,82
113	4113,09			

Таблица 4.8б

## Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №7

(конденсат КДМ)

№ 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, %
Бак для конденсата 60				
106, 107	294,28	4,02	4,0	98,63
108,109	290,26			
Бак для конденсата 61				
110, 111	1466,43	83,81	83,81	94,28
112	1382,62			
Бак для конденсата 62				
108, 112	1496,44	167,21	167,21	88,82
113	1329,23			

**Блок №8 (приемка баланса, рубка, сортирование и хранение щепы)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №8 (приемка баланса, рубка, сортирование и хранение щепы) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.9 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.9в.

Таблица 4.8в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
№7 (конденсат КДМ)

№ 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, %
Бак для конденсата 60				
106, 107	443,65	76,85	76,85	82,67
108,109	366,79			
Бак для конденсата 61				
110, 111	2210,78	126,35	126,35	94,28
112	2084,42			
Бак для конденсата 62				
108, 112	2256,01	252,09	252,09	88,82
113	2003,92			

Таблица 4.9а

Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №8 (приемка  
баланса, рубка, сортирование и хранение щепы)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Удаление пыли в циклоне 66				
119	259,96	2,35	2,35	-
120, 145	257,61			
Сортирование щепы 68				
121	251,44	15,67	15,67	-
122, 146	235,77			

Тепловой и эксергетический к.п.д. элементов 66 и 68 не были рассчитаны, так как это не теплообменные аппараты, изменение температур не происходит.

Таблица 4.9б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №8 (приемка баланса, рубка, сортирование и хранение щепы)

№ 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, %
Удаление пыли в циклоне 6б				
119	13,75	0,12	0,12	-
120, 145	13,62			
Сортирование щепы 68				
121	20,59	7,28	7,288	-
122, 146	13,30			

Таблица 4.9в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок №8 (приемка баланса, рубка, сортирование и хранение щепы)

№ 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, %
Удаление пыли в циклоне 6б				
119	13,75	0,12	0,12	-
120, 145	13,62			
Сортирование щепы 68				
121	20,59	7,28	7,28	-
122, 146	13,30			

### Блок №9 (промывка щепы)

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №9 (приемка баланса, рубка, сортирование и хранение щепы) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 2.10 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.10в.

Наименьший эксергетический КПД блока, определенный по формуле (4.4) составляет 41,55 % в барабанном сгустителе 104, что объясняется

необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.

Таблица 4.10а

Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №9  
(промывка щепы)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Установка для промывки щепы 75				
127, 160, 179	1086,38	63,55	63,55	94,14
128, 152	1022,82			
Бак оборотной воды 102				
154, 161, 165	495,42	49,38	49,38	90,03
155, 157, 159	446,03			
Барабанный сгуститель 104				
155	52,75	5,75	5,75	89,09
156	47,01			
Скребок транспортер 106				
152, 156, 158	676,88	56,88	56,88	91,59
153	620			

Таблица 4.10б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №9  
(промывка щепы)

№ 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, %
Установка для промывки щепы 75				
127, 160, 179	98,32	31,29	31,29	68,17
128, 152	67,02			
Бак оборотной воды 102				
154, 161, 165	84,16	34,805	34,80	58,64
155, 157, 159	49,35			
Барабанный сгуститель 104				
155	5,983	3,49	3,49	41,55
156	2,48			
Скребок транспортер 106				
152, 156, 158	35,80	3,01	3,01	91,59
153	32,79			

Таблица 4.10в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
№9 (промывка щепы)

№ 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, %
Установка для промывки щепы 75				
127, 160, 179	629,59	562,56	562,56	60,64
128, 152	67,02			
Бак оборотной воды 102				
154, 161, 165	320,27	78,77	78,77	75,40
155, 157, 159	241,50			
Барабанный сгуститель 104				
155	5,98	3,49	3,49	41,5
156	2,48			
Скребковый транспортер 106				
152, 156, 158	35,80	3,01	3,01	91,5
153	32,79			

### Блок №10 (варка щепы)

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №10 (варка щепы) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.11 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.11в.

Тепловой и эксергетический к.п.д. элемента 109 не были рассчитаны, так как это не теплообменник, изменение температур не происходит. Наименьший эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.4) составляет 52,57 % в баке оборотной воды 97, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком.

Таблица 4.11а

## Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №10 (варка щепы)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та		Теплота потока, кВт	Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Варочный аппарат 77					
129, 182, 183		3428,98	99,04	99,04	97,11
130, 161		3329,94			
Расходный бак варочного раствора 109					
180		1546,09	4,22	4,22	-
181		1541,86			
Выдувной резервуар 78					
130, 170		3003,78	57,19	57,19	98,09
131, 162		2946,58			
Скруббер «Вентури» 95					
192	163	54,25	93,16	0,13	99,66
162	193	141,56	102,51		
Бак охлаждающих вод от оборудования (бак оборотной воды) 97					
190		217,64	34,35	34,35	84,21
179,191		183,29			

Таблица 4.11б

## Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №10 (варка щепы)

№ 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, %
Варочный аппарат 77						
129, 182, 183		1245,54		311,36	311,36	75,01
130, 161		934,18				
Расходный бак варочного раствора 109						
180		577,60		1,57	1,57	-
181		576,02				
Выдувной резервуар 78						
130, 170		878,57		17,95	17,95	97,95
131, 162		860,62				
Скруббер «Вентури» 95						
192	163	6,15	19,92	13,77	10,84	55,94
162	193	36,24	11,64			
Бак охлаждающих вод от оборудования (бак оборотной воды) 97						
190		24,68		11,70	11,70	52,57
179,191		12,97				

Таблица 4.11в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
№10 (варка щепы)

№ 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, %		
Варочный аппарат 77						
129, 182, 183	1453,37	41,42	41,42	97,14		
130, 161	1411,94					
Расходный бак варочного раствора 109						
180	656,31	5,24	5,24065822	-		
181	661,55					
Выдувной резервуар 78						
130, 170	1255,92	9,86	9,86	99,21		
131, 162	1246,05					
Скруббер «Вентури» 95						
192	163	47,19	59,27	12,08	3,46	77,73
162	193	40,05	55,59			
Бак охлаждающих вод от оборудования (бак оборотной воды) 97						
190	208,15	22,02	22,02	89,41		
179,191	186,12					

### Блок №11 (промывка полуцеллюлозы)

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №11 (промывка ПЦ) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических к.п.д. представлены в таблице 4.12 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.12в.

Наименьший эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.5) составляет 41,97 % в сгустителе 83, что объясняется необратимостью процессов теплообмена из-за большой разности температур между греющим и нагреваемым потоком. Суммарный эксергетический к.п.д. элемента 111 ниже эксергетического к.п.д. по тепловой составляющей из-за отсутствия «полезности» составляющей по давлению в данном элементе.



Таблица 4.12а

## Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №11 (промывка ПЦ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та		Теплота потока, кВт		Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Дисковая мельница 79						
131		2805,02		147,40	147,40	94,74
132		2657,61				
Сгуститель №1 ПФЦ 83						
135	136	1231,32	718,19	513,12	126,07	75,42
166	173	7325,50	7712,55			
Бак фильтра 111						
166, 178, 184		16749,74		4004,41	4004,41	76,09
167, 169, 171, 172, 174, 176		12745,32				

Таблица 4.12б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №11  
(промывка ПЦ)

№ 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, %
Дисковая мельница 79						
131		824,37		198,40	198,40	75,93
132		625,96				
Сгуститель №1 ПФЦ 83						
135	136	235,13	81,45	153,67	89,17	41,97
166	173	1220,92	1285,43			
Бак фильтра 111						
166, 178, 184		1721,72		459,61	459,61	73,30
167, 169, 171, 172, 174, 176		1262,11				

**Блок №12 (отжим отработанного раствора и размолотой полуцеллюлозы)**

Результаты расчета для элементов, входящих в блок №12 (отжим отработанного раствора и размолотой ПЦ) с указанием потерь теплоты, эксергии в элементах схемы, тепловых и эксергетических КПД представлены в таблице 4.13 (а, б). Результаты расчета суммарной эксергии с учетом составляющих по теплоте и по давлению представлены в таблице 4.13в.

Таблица 4.12в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
№11 (промывка ПЦ)

№ 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, %
Дисковая мельница 79						
131		1306,01		71,11	71,11	94,55
132		1234,89				
Сгуститель №1 ПФЦ 83						
135	136	829,52	451,54	377,98	2482,80	69,86
166	173	4925,95	7786,74	2860,78		
Бак фильтра 111						
166, 178, 184		21199,52		7379,27	7379,27	65,19
167, 169, 171, 172, 174, 176		13820,25				

Таблица 4.13а

Результаты теплового расчета элементов, входящих в блок №12 (отжим отработанного раствора и размолотой ПЦ)

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та		Теплота потока, кВт		Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Сгуститель №2 89						
141	142	3705,18	3835,08	129,90	4,08	96,95
168	178	171,33	37,34	133,98		
Массный бассейн № 3 90						
142		3835,08		2,77	2,77	99,92
143, 148		3832,31				

Тепловой и эксергетический к.п.д. элементов одинаковые из-за постоянства температур потоков на входе и выходе из элементов. Суммарный эксергетический к.п.д. элемента 89 ниже эксергетического к.п.д. по тепловой составляющей из-за отсутствия «полезности» составляющей по давлению в данном элементе.

Таблица 4.13б

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок №12 (отжим отработанного раствора и размолотой ПЦ)

№ 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, %
Сгуститель №2 89						
141	142	420,27	434,97	14,73	0,46	96,95
168	178	19,43	4,23	15,19		
Массный бассейн № 3 90						
142		434,97		0,31	0,31	99,92
143, 148		434,65				

Таблица 4.13в

Результаты суммарного эксергетического расчета элементов, входящих в блок №12 (отжим отработанного раствора и размолотой ПЦ)

№ 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, %
Сгуститель №2 89						
141	142	2831,61	2079,76	751,85	879,99	70,62
168	178	163,85	35,71	128,14		
Массный бассейн № 3 90						
142		2079,75		1,50	1,50	99,92
143, 148		2078,25				

#### 4.4 Расчет сушильной установки картоноделательной машины

Исходные данные:

- КДМ – круглосеточная картоноделательная машина (рис. 4.1);
- производительность по паспорту  $G_M = 140 \text{ т/сут} = 5833,33 \text{ кг/ч}$ ;
- скорость машины  $v = 100 \text{ м/мин}$ ;
- обрезаемая ширина полотна  $B_{об} = 3,2 \text{ м}$ ;
- необрезаемая ширина полотна  $B_H = 3,3 \text{ м}$ ;

- диаметр цилиндров сушильной части  $d = 1,5$  м;
- коэффициент обхвата бумагой цилиндров  $b = 0,63$ .

Характеристики полотна:

- сухость полотна перед сушкой (после прессы)  $S_H = 43$  %;
- влажность полотна начальная (перед сушкой)  $w_H = 57$  %;
- сухость полотна после сушки  $S_K = 93$  %;
- влажность полотна после сушки  $w_K = 7$  %;
- температура полотна перед сушкой  $T_H = 60$  °С;
- температура полотна после сушки  $T_K = 90$  °С;
- теплоемкость сухого полотна  $C_{сп} = 1,46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \text{°С}$ .

Характеристики пара:

- давление  $P_{\text{пар}} = 0,345$  МПа;
- температура  $T_{\text{пар}} = 138,4$ °С.

Характеристики воздуха (сушки):

- влагосодержание отработавшей паровоздушной смеси  $d_{\text{отр}} = 85$  г/кг;
- влагосодержание воздуха подаваемого на сушильную часть  $d_{\text{под}} = 20$  г/кг;
- теплоемкость влаги  $C_w = 4,19$  кДж/кг·°С;
- теплоемкость воздуха  $C_{\text{воздух}} = 1,005$  кДж/кг·°С;
- температура отработанного воздуха  $T_1 = 74$ °С;
- температура подаваемого воздуха на БДМ  $T_2 = 100$ °С.

Материальный баланс по высушиваемому материалу является общим для конвективной, контактной и других видов сушки.

Материальный баланс будет иметь следующий вид: по всему материалу, подвергаемому сушке:

$$G_1 = G_2 + M_{\text{вл}}; \quad (4.15)$$

$$G_2 = G_M = 5,833 \cdot 10^3, \quad (4.16)$$

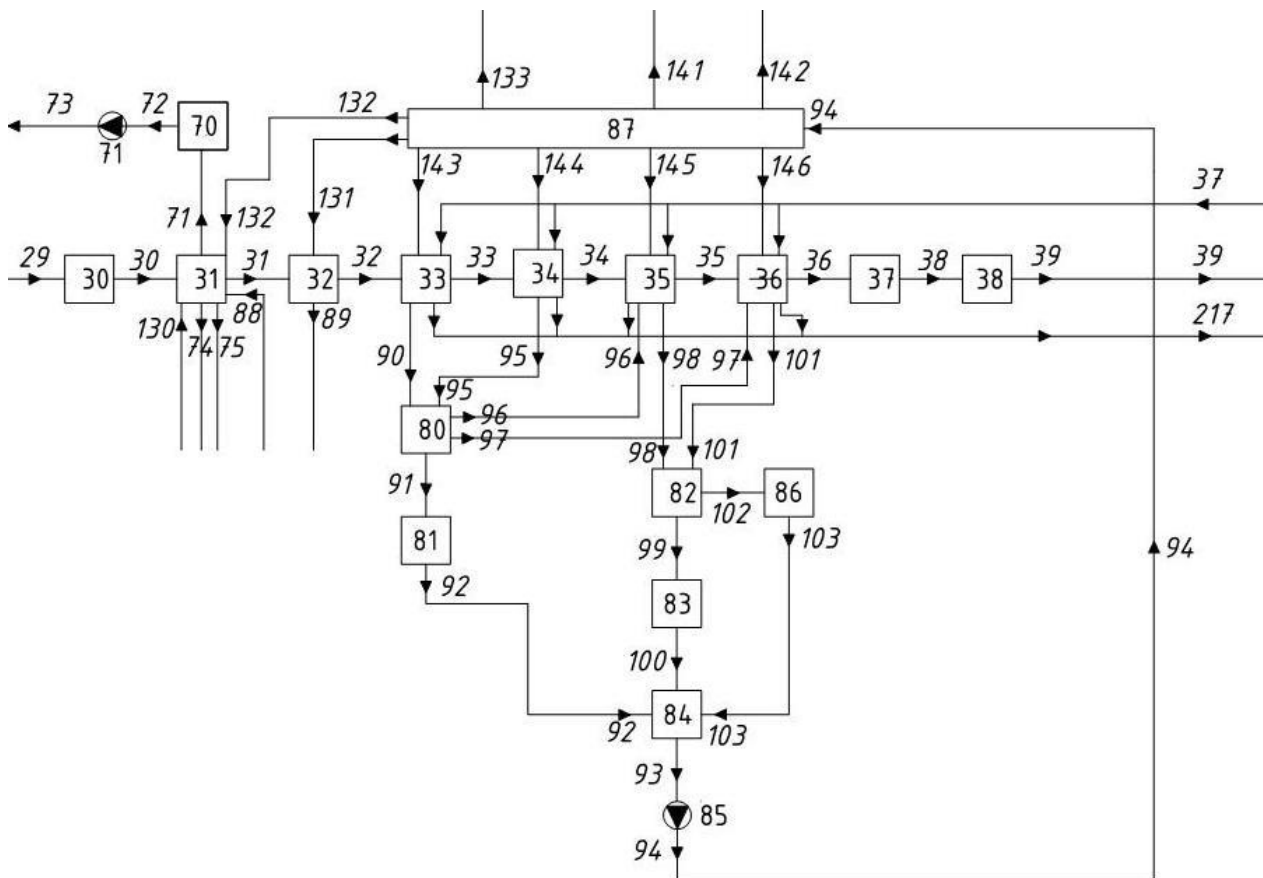


Рис. 4.1 Структурная схема сушильной части картоноделательной машины

где  $G_1$  – количество влажного материала, поступающего на сушку, кг/ч;

$G_2$  – количество высушенного материала, кг/ч;

$u_1, u_2$  – начальная и конечная влажности материала соответственно (считая на общую массу материала), %;

$M_{\text{вл}}$  – количество влаги, удаляемой из материала при сушке, кг/ч.

Обычно целью составления материального баланса является определение количество влаги  $W$ , удаляемой при сушке:

$$M_{\text{вл}} = G_1 - G_2; \quad (4.17)$$

$$M_{\text{вл}} = G_2 \cdot \left( \frac{w_{\text{н}} - w_{\text{к}}}{100 - w_{\text{н}}} \right),$$

$$M_{\text{вл}} = 5,833 \cdot 10^3 \cdot ((57 - 7)/(100 - 57)) = 6,782 \cdot 10^3.$$

Влажесодержание материала перед сушкой:

$$U_H = \frac{100 - S_H}{S_H}, \quad (4.18)$$

$$U_H = (100 - 43)/43 = 1,326.$$

Влажесодержание материала после сушки:

$$U_K = (100 - S_K)/S_K \quad (4.19)$$

$$U_K = (100 - 93)/93 = 0,075.$$

Выразив содержание влаги в бумажном полотне через влажесодержание  $U$ , можно определить количество удаляемой влаги из него  $M_{\text{вл}}$ , кг влаги/ч:

$$M_{\text{вл}} = G_M \cdot (U_H - U_K), \quad (4.20)$$

$$M_{\text{вл}} = 5,833 \cdot 10^3 \cdot (1,326 - 0,075) = 7,293 \cdot 10^3.$$

Расчет тепла на сушку:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{пот}}. \quad (4.21)$$

Таким образом, полезный расход тепла на сушку бумаги, кДж/ч:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пол}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \\ &= G_M \cdot C_{\text{сп}} \cdot (T_K - T_H) + G_M \cdot U_H \cdot C_w \cdot (T_K - T_H) + \\ &+ M_{\text{вл}} \cdot (2677,5 - C_w \cdot T_K) + (G_M \cdot 0,3 - G_M \cdot U_K) \cdot 4000 = \\ &= 5,833 \cdot 10^3 \cdot 1,46 (90 - 60) + 5,833 \cdot 10^3 \cdot 1,326 \cdot 4,19 \cdot (90 - 60) \\ &+ 7,293 \cdot 10^3 \cdot (2677,5 - 4,19 \cdot 90) + (5,833 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \\ &- 5,833 \cdot 10^3 \cdot 0,075) \cdot 4000 = 2,207 \cdot 10^7. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Общий массовый расход воздуха для ассимиляции образовавшихся водяных паров определяют по формуле  $L_c, \text{м}^3/\text{ч}$ :

$$\begin{aligned} L_c &= ((1000 \cdot M_{\text{вл}})/(d_{\text{отр}} - d_{\text{под}})) & (4.23) \\ &= ((1000 \cdot 6,782 \cdot 103)/(85 - 20)) = \\ &= 1,122 \cdot 10^5 \text{ кг/ч} = 31,17 \text{ кг/с} = 198911,71 \text{ м}^3/\text{ч}; \end{aligned}$$

$$L_{\text{ост}} = L_c = 1,122 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}; \quad (4.24)$$

$$G_{\text{смесь}} = L_c/3600 = 31,17. \quad (4.25)$$

Массовый расход воды в паровоздушной смеси  $G_{\text{вода}}, \text{кг/с}$ :

$$G_{\text{вода}} = (G_{\text{смесь}} \cdot 85)/1000 = 2,649. \quad (4.26)$$

Расчет количество теплоты, содержащееся в отработанном воздухе  $Q_c$ , кВт:

$$G_{\text{воздух}} = G_{\text{смесь}} - G_{\text{вода}}; \quad (4.27)$$

$$G_{\text{воздух}} = 31,17 - 2,649 = 28,519 \text{ кг/с};$$

$$Q_c = T_1 \cdot (G_{\text{воздух}} \cdot C_{\text{воздух}} + G_{\text{вода}} \cdot C_w); \quad (4.28)$$

$$Q_c = 74 \cdot (28,519 \cdot 1,005 + 2,649 \cdot 4,19) = 2,942 \cdot 10^3 \text{ кВт}.$$

#### **4.5 Результаты анализа термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги и картона**

В результате проведенного термодинамического анализа всей системы выявлено, что потоки, сбрасываемые в окружающую среду, то есть тепловые потери, которые можно полезно использовать – это обратная вода в бассейне

подсеточной воды 54, летучие вещества в скруббере «Вентури» 95, потоки воздуха сушильных установок 34, 35, 36, 37 и потоки конденсата КДМ.

Эксергетические потери в элементах системы составляют: 925 кВт (или 3147 кг/ч) оборотной воды, 11,63 кВт (11,62 кг/ч) летучих веществ, 599,23 кВт (114120 кг/ч) отработанного влажного воздуха и 1329,23 кВт (25692 кг/ч) конденсата.

Эксергетический к.п.д. элемента 54 при определении по формуле (4.4) составляет 86 %. Эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.5) составляет 41,1 %. Как видно из расчета, при неизменном значении величины потерь эксергии в системе определение термодинамического КПД по разным формулам дает разные результаты. Термодинамический КПД, определяемый по формуле (4.4), является несколько завышенным по сравнению с эксергетическим к.п.д., определяемым по формуле (4.5). Поэтому для определения степени термодинамического совершенства теплотехнологических процессов, происходящих в элементах теплотехнологической схемы, целесообразно использовать формулу (4.5). Доля использования подведенной к блоку эксергии в системе производства определяется:

$$КСИ_E = \frac{E_{86}}{E_{83} + E_{84}} = \frac{1706,76}{925,8 + 4709,9} \cdot 100\% = 30\%. \quad (4.29)$$

Доля использования отведенной из блока эксергии в системе производства составляет  $КСИ(E)/КПД(E)=0,34$ . Из блока отводится эксергия с потоком оборотной воды в количестве 925 кВт (3147 кг/ч) с температурой 40 °С, которая нигде больше полезно не используется.

Эксергетический к.п.д. элемента 95 при определении по формуле (4.4) составляет 99 %. Эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.5) составляет 55,94 %. Как видно из расчета, при неизменном значении величины потерь эксергии в системе определение термодинамического КПД по разным формулам дает разные результаты. Термодинамический КПД, определяемый по



формуле (4.4), является несколько завышенным по сравнению с эксергетическим к.п.д., определяемым по формуле (4.5). Поэтому для определения степени термодинамического совершенства теплотехнологических процессов, происходящих в элементах теплотехнологической схемы, целесообразно использовать формулу (4.5). Доля использования подведенной к блоку эксергии в системе производства определяется:

$$КСИ_E = \frac{E_{163}}{E_{162} + E_{192}} = \frac{19,92}{36,24 + 6,15} \cdot 100\% = 46,9\%. \quad (4.30)$$

Доля использования отведенной из блока эксергии в системе производства составляет  $КСИ(E)/КПД(E)=0,85$ . Из блока отводится эксергия с потоком летучих веществ количестве 11,63 кВт (11,62 кг/ч) с температурой 40 °С, которая нигде больше полезно не используется.

Эксергетический к.п.д. элементов сушильных установок при определении по формуле (4.4) составляет 88 %. Эксергетический к.п.д. блока, определенный по формуле (4.5) составляет 46,9 %. Как видно из расчета, при неизменном значении величины потерь эксергии в системе определение термодинамического к.п.д. по разным формулам дает разные результаты. Термодинамический к.п.д., определяемый по формуле (4.4), является несколько завышенным по сравнению с эксергетическим к.п.д., определяемым по формуле (4.5). Поэтому для определения степени термодинамического совершенства теплотехнологических процессов, происходящих в элементах теплотехнологической схемы, целесообразно использовать формулу (4.5). Доля использования подведенной к блоку эксергии потоком теплого воздуха в системе производства определяется:

$$КСИ_E = \frac{E_{38} + E_{94} + E_{113}}{E_{34} + E_{115} + E_{116} + E_{109}} = \frac{3832,24}{5806,43} \cdot 100\% = 66\%. \quad (4.31)$$

Доля использования отведенной из блока эксергии потоком отработанного влажного воздуха в системе производства составляет  $KСИ(E)/КПД(E)=0,75$ . Из блока отводится эксергия с потоком отработанного влажного воздуха в количестве 599,23 кВт (114120 кг/ч) с температурой 84 °С, которая нигде больше полезно не используется.

Доля использования подведенной к блоку эксергии потоком пара в системе производства определяется:

$$KСИ_E = \frac{E_{38} + E_{94} + E_{117}}{E_{34} + E_{115} + E_{116} + E_{109}} = \frac{3588}{5806,43} \cdot 100\% = 61\%. \quad (4.32)$$

Доля использования отведенной из блока эксергии потоком конденсата в системе производства составляет  $KСИ(E)/КПД(E)=0,69$ . Из блока отводится эксергия с потоком конденсата в количестве 1329,23 кВт (25692 кг/ч) с температурой 137 °С, которая нигде больше полезно не используется.

Таким образом, целлюлозно-бумажное производство рассмотрено как объект термодинамического анализа и оценки термодинамической эффективности. Для анализа термодинамической эффективности основными источниками информации является технологическая схема производства бумаги.

Были рассмотрены технологическая схема производства бумаги и тепловой баланс технологической схемы.

Произведены расчеты, проанализировав которые, сделали вывод, 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. Потери эксергетической мощности в элементах системы составили: 925 кВт (3147 кг/ч) с оборотной водой, 11,63 кВт (11,62 кг/ч) с летучими веществами, 599,23 кВт (114120 кг/ч) с отработанным нагретым влажным воздухом и 1329,23 кВт (25692 кг/ч) с конденсатом.

## **РАЗДЕЛ 5 ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ И КАРТОНА**

### **5.1 Оценка термодинамического потенциала вторичных энергетических ресурсов теплотехнологической схемы производства бумаги и картона**

Проведем оценку термодинамического потенциала вторичных энергоресурсов исследуемой схемы. Для этого рассмотрим входные и выходные потоки со значительной эксергетической мощностью в системе с целью оценки термодинамического потенциала выходных потоков, то есть проведем поиск вторичных энергоресурсов и оценку потребности в энергоресурсах (табл.5.1 а,б).

Произведен расчет баланса входящих и выходящих потоком. Выделены потоки с наибольшей эксергетической ценностью, которые могут найти применение в данной схеме (таблица 5.2).

Проведенный анализ показал, что значительной эксергетической мощностью характеризуются потоки уходящего воздуха бумагоделательной машины, теплая вода при охлаждении щелока и теплая вода при конденсации водно-спиртовых паров метанольной и спиртовой колонн на стадии производстве спирта. Эти потоки могут быть использованы в ТНУ для утилизации низкопотенциальных ВЭР.

В таблице 5.3 а,б представлены подробнее результаты расчета термодинамической эффективности на примере одного из участков схемы, а именно сушильной части бумагоделательной машины.

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.

Таблица 5.1 а

## Входящие потоки

№ потока	В аппарат	Вещество	t, °С	P, МПа	G, кг/ч	i, кДж/кг	Q,кВт	E(q),кВт	e(p), кДж/кг	E(p),кВт
1	1	Макулатура	10	0,11	5800,00	15,50	24,97	0,49	6,56	10,57
102		Химикаты (клей,крахмал)	10	0,11	780,00	84,01	18,20	0,35	6,56	1,42
116	34,35, 36,37	Теплый воздух	100	0,11	102672,00	100,50	2866,26	733,85	6,56	187,15
118	65	Древесина	10	0,11	60380,00	15,50	259,97	5,05	6,56	110,06
194	53	Оборотная вода (сетевая)	30	0,45	67950,00	126,06	2379,38	200,25	118,76	2241,59
195	52	Оборотная вода (сетевая)	30	0,45	2500,00	126,06	87,54	7,37	118,76	82,47
196	46	Оборотная вода (сетевая)	30	0,45	667347,50	126,06	23368,29	1966,64	118,76	22015,02
213	121	Пар	150	0,30	2208,00	2961,18	1816,19	624,72	86,47	53,03
219	122	Пар	150	0,30	1900,00	2961,18	1562,85	537,57	86,47	45,64
225	123	Пар	150	0,30	2133,47	2961,18	1754,89	603,63	86,47	51,24
227	123	10%-ный раствор едкого награ	20	0,11	16,70	13,40	0,06	0,06	6,56	0,03
240	133	Пар	250	0,50	2060,00	2961,13	1694,42	795,38	127,15	72,76
247	134	Воздух (кислород)	20	0,11	38543,66	0,91	9,74	0,52	6,56	70,26
248	135	Воздух (кислород)	20	0,11	127120,40	0,91	32,13	1,70	6,56	231,71
250	134	Соли азота и фосфора	20	0,11	71313,43	67,30	1333,16	70,53	6,56	129,99
251	137	Реагенты	20	0,11	458600,00	92,00	11719,78	619,99	6,56	835,93

Таблица 5.16

## Выходящие потоки

№ поток а	Из аппарата	Вещество	t, °C	P, МПа	G, кг/ч	i, кДж/кг	Q,кВт	E(q),кВт	e(p),кДж/кг	E(p),кВт
40	39	Картонное полотно сухость 93%	80	0,11	5833,33	124,00	200,93	42,97	6,56	10,63
48	43	Отходы в отвал	25	0,11	274,62	38,75	2,96	0,20	6,56	0,50
59	47	Отходы в отвал	40	0,11	25500,00	62,00	439,17	49,81	6,56	46,48
85	54	Оборотная вода	30	0,11	595000,00	125,75	20798,56	1430,77	6,56	1084,56
99	28	Отходы 3,5%(волокнистая масса 1,5%)	40	0,11	26029,19	167,47	1210,86	137,33	6,56	47,45
100	26	Отходы	40	0,11	95345,03	167,47	4435,40	503,06	6,56	173,79
117	34,3 5,36, 37	Отработанный влажный воздух	74	0,1013	109814,44	298,19	13728,16	2749,59	0,00	0,00
145	66	Отходы от щепы	20	0,11	717,00	31,00	6,17	0,33	6,56	1,31
147	69	Крупная щепа+отходы	20	0,11	4780,00	31,00	41,16	2,18	6,56	8,71
153	106	Отходы	20	0,11	72000,00	31,00	620,00	32,80	6,56	131,24
193	95	Летучие в-ва	30	0,11	2200,00	125,84	76,90	6,47	6,56	4,01
197	59	Очищенная сточная вода	25	0,15	22754,00	104,97	663,47	45,64	31,26	197,60

Продолжение таблицы 5.16

№ поток а	Из аппарата	Вещество	t, °С	P, МПа	G, кг/ч	i, кДж/кг	Q,кВт	E(q),кВт	e(p),кДж/кг	E(p),кВт
207	124	Этиловый спирт (не более 0,1% метилового спирта)	78,2	0,11	808,00	269,01	60,38	60,38	6,56	1,47
209	117	Углекислота	32	0,11	5323,00	20,80	30,76	30,76	6,56	9,70
210	117	Дрожжи (избыток)	32	0,11	1110,45	20,80	6,42	6,42	6,56	2,02
211	118	Дрожжи (мертвые дрожжи)	32	0,11	7350,40	20,80	42,47	42,47	6,56	13,40
212	121	Сульфитно-спиртовая барда	105	0,11	10970,00	70,35	214,37	214,37	6,56	20,00
218	126	Углекислый газ	65	0,11	438,80	42,25	5,15	5,15	6,56	0,80
224	128	Эфир-альдегидная фракция	65	0,11	4,50	43,55	0,05	0,05	6,56	0,01
226	123	Лютер	105,30	0,15	1994,00	441,50	244,54	244,54	31,26	17,32
228	123	Сивушные масла	85	0,15	55,60	226,10	3,49	3,49	31,26	0,48
235	132	Метанол	60	0,11	2,70	156,00	0,12	0,12	6,56	0,00
241	133	Конденсат	145	0,45	1060,00	610,72	179,82	60,44	118,76	34,97
246	57	Ил	20	0,11	31277,82	31,00	269,34	14,25	6,56	57,01
249	136	Ил	20	0,11	76271,00	31,00	656,78	34,74	6,56	139,03
252	130	Эфиры	65	0,11	184,40	43,55	2,23	2,23	6,56	0,34
253	123	Поток, нагретый верхн. продуктом	63,5	0,11	2133,47	2290,02	1357,14	237,95	6,56	3,89

Баланс входящих и выходящих потоков

№ потока	Тепловая мощность входящих потоков Q1,кВт	Эксергетическая мощность входящих потоков E(q)1,кВт	№ потока	Тепловая мощность выходящих потоков Q2,кВт	Эксергетическая мощность выходящих потоков E(q)2,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	20798,56	1430,77
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	13728,16	2749,59
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	0,06	193	76,90	6,47
240	1694,42	795,38	197	663,47	45,64
247	9,74	0,52	207	60,38	60,38
248	32,13	1,70	209	30,76	30,76
250	1333,16	70,53	210	6,42	6,42
251	11719,78	619,99	211	42,47	42,47
			212	214,37	214,37
			218	5,15	5,15
			224	0,05	0,05
			226	244,54	244,54
			228	3,49	3,49
			235	0,12	0,12
			241	179,82	60,44
			246	269,34	14,25
			249	656,78	34,74
			252	2,23	2,23

№ потока	Тепловая мощность входящих потоков Q1,кВт	Эксергетическая мощность входящих потоков E(q)1,кВт	№ потока	Тепловая мощность выходящих потоков Q2,кВт	Эксергетическая мощность выходящих потоков E(q)2,кВт
			253	1357,14	237,95
Итого:	48927,84	6168,03	Итого:	45296,78	5150,99
Потери	3631,06	1017,04			
КПД	92,58	83,51			
КСИ	17,88	11,14			



Таблица 5.3 а

## Результаты расчета теплового КПД сушильной части

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та		Теплота потока, кВт		Изменение теплоты потока в элементе, кВт	Потери теплоты в элементе, кВт	Тепловой КПД, %
Сушка в 1 группе цилиндров сушильной части 34						
115.1, 116.1	106, 117.1	7009,31	3447,14	3562,16	266,85	92,508635
34	35, 94.4	927,69	4223,00	3295,31		
Сушка в 2 группе цилиндров сушильной части 35						
115.2, 116.2	107, 117.2	7009,31	3447,149	3562,169	135,07	96,20
35	36, 94.3	1296,87	4723,97	3427,09		
Сушка в 3 группе цилиндров сушильной части 36						
115.3, 116.3, 109.1	110, 117.3	7555,28	4407,70	3147,57	221,44	92,96
36	37, 94.2	1797,83	4723,97	2926,13		
Сушка в 4 группе цилиндров сушильной части 37						
115.4, 116.4, 109.2	111, 117.4	7555,28	6113,64	1441,63	178,03	87,65
37	38, 94.1	1797,83	3061,43	1263,59		

Таблица 5.3 б

## Результаты эксергетического КПД сушильной части

№ 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, %
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	2282,50	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	2282,50	1675,12	607,38	322,56	46,89
37	38, 94.1	423,45	708,27	284,81		

Далее подробнее рассмотрим участок сушильной части бумагоделательной машины, проведем расчет сушильной установки и рассмотрим целесообразность подключения утилизационной установки.

## 5.2 Расчет теплонасосной установки для рекуперации тепла отработанного влажного воздуха при производстве бумаги и картона

Исходные данные:

- тепловая нагрузка  $Q_{\text{ТН}} = 2942,44$  кВт;
- температура низкопотенциального теплоносителя (на входе в ТН)  $t_{\text{Н1}} = 74^\circ\text{C}$ ;
- температура низкопотенциального теплоносителя (после ТН)  $t_{\text{Н2}} = 20^\circ\text{C}$ ;
- температура высокопотенциального теплоносителя (на входе в ТН)  $t_{\text{В1}} = 20^\circ\text{C}$ ;
- температура горячего воздуха после ТН  $t_{\text{В2}} = 110^\circ\text{C}$ ;
- температура окружающей среды  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ;
- перепады температуры на выходе из теплообменников  $\Delta t_{\text{исп}} = 5^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{\text{к}} = 5^\circ\text{C}$ ;

В качестве хладагента используется фреон R600 [64].

Температура испарения фреона  $t_{\text{и}}, ^\circ\text{C}$ :

$$t_{\text{и}} = t_{\text{Н1}} - \Delta t_{\text{исп}}; \quad (5.1)$$

$$t_{\text{и}} = 74 - 5 = 69.$$

По температуре испарения  $69^\circ\text{C}$  по таблицам термодинамических свойств хладагента R 600 в состоянии насыщения или по  $p, h$ -диаграмме определяются параметры в точке 1 энтальпия на правой пограничной кривой  $h''$  и давление  $p$ :

$$h_1 = 687,5 \text{ кДж/кг}; \quad (5.2)$$

$$p_{\text{и}} = 1,2 \text{ МПа.}$$

Температура конденсации фреона,  $^\circ\text{C}$ :

$$t_k = t_{B2} + \Delta t_k; \quad (5.3)$$

$$t_k = 100 + 5 = 105.$$

По температуре конденсации  $t_k$  по таблицам термодинамических свойств или по  $p, h$ -диаграмме определяются параметры в точке 3: энтальпия на левой пограничной кривой  $h'$  и давление  $p$ :  $h_3 = 485$  кДж/кг;  $p_k = 2,3$  МПа.

На  $p, h$ -диаграмме на пересечении линии постоянной энтропии  $S_1$ , проходящей через точку 1, и линии изобары  $p_k$ , проходящей через точку 3, определяется точка 2а, затем по диаграмме определяется энтальпия в этой точке:  $h_{2a} = 737$  кДж/кг.

Адиабатный КПД компрессора  $\eta_a$ :

$$\eta_a = 0,98(273 + t_0)/(273 + t_k); \quad (5.4)$$

$$\eta_a = 0,98(273 + 20)/(273 + 115) = 0,76.$$

Энтальпия фреона после сжатия с учетом потерь  $h_2$ , кДж/кг:

$$h_2 = h_1 + ((h_{2a} - h_1)/\eta_a); \quad (5.5)$$

$$h_2 = 687,5 + ((737 - 687,5)/0,76) = 752,663.$$

По значению энтальпии  $h_2 = 752,663$  кДж/кг и давлению  $p_k = 2,3$  МПа на диаграмме отмечается точка 2. Температура в этой точке:  $t_2 = 110^\circ\text{C}$ .

По значению энтальпии  $h_3 = h_4 = 485$  кДж/кг и давлению  $p_n = 1,2$  МПа на диаграмме отмечается точка 4.

Удельные тепловые нагрузки в узлах теплового насоса  $q_n, q_k, l_{сж}$  кДж/кг:

$$q_n = h_1 - h_4; \quad (5.6)$$

$$q_n = 687,5 - 485 = 202,5;$$

$$q_k = h_2 - h_3; \quad (5.7)$$

$$q_k = 752,663 - 485 = 267,663;$$

$$l_{сж} = h_2 - h_1 ; \quad (5.8)$$

$$l_{сж} = 752,663 - 687,663 = 65,163.$$

Правильность расчета определяется проверкой теплового баланса  $q_k$ , кДж/кг:

$$q_H + l_{сж} = q_k \quad (5.9)$$

$$q_k = 202,5 + 65,163 = 267,663.$$

Тепловая нагрузка теплового насоса  $q_{тн}$ , кДж/кг:

$$q_{тн} = q_k = 267,663 \text{ кДж/кг.} \quad (5.10)$$

Энергия, потребляемая электродвигателем  $W$ , кДж/кг:

$$W = l_{сж} / (\eta_{э.м} \eta_{э}); \quad (5.11)$$

$$W = 65,163 / (0,95 \cdot 0,8) = 85,741.$$

Показатели энергетической эффективности теплового насоса:

– коэффициент преобразования теплоты,  $\mu$ :

$$\mu = q_k / l_{сж}; \quad (5.12)$$

$$\mu = 267,663 / 65,163 = 4,108;$$

При допустимых значениях от 2 до 7, полученное значение выше среднего.

– коэффициент преобразования электроэнергии,  $\mu_{э}$ :

$$\mu_{э} = \mu_{э.м} \cdot \eta_{э} \cdot \mu; \quad (5.13)$$

$$\mu_{э} = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 4,108 = 3,122;$$

– удельный расход первичной энергии ПЭ:

$$\begin{aligned} \text{ПЭ} &= (1/(\eta_{\text{э.м}}\eta_{\text{э}}\eta_{\text{э.с}}\eta_{\text{пер}})) \cdot (1/\mu); & (5.14) \\ \text{ПЭ} &= (1/(0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,4 \cdot 0,95)) \cdot (1/4,108) = 0,843. \end{aligned}$$

Так как  $\text{ПЭ} < 1$ , то с энергетической точки зрения отопление с использованием теплового насоса выгоднее, чем при сжигании природного топлива, применяемого для производства электроэнергии.

Степень повышения давления в компрессор,  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= p_{\text{к}}/p_{\text{н}}; & (5.15) \\ \varepsilon &= 2,3 / 1,2 = 1,917; \end{aligned}$$

Производится эксергетический расчет схемы:

– средняя логарифмическая температура холодного теплоносителя,  $T_{\text{ср. н.}}$ , К;

$$\begin{aligned} T_{\text{ср. н.}} &= (t_{\text{н1}} - t_{\text{н2}}) / (\ln(t_{\text{н1}} + 273) / (t_{\text{н2}} + 273)); & (5.16) \\ T_{\text{ср. н.}} &= (74 - 20) / (\ln(74 + 273) / (20 + 273)) = 319,239; \end{aligned}$$

– эксергетическая температура низкопотенциального теплоносителя,  $\tau_{\text{н}}$ :

$$\begin{aligned} \tau_{\text{н}} &= (T_{\text{ср. н.}} - (t_0 + 273)) / T_{\text{ср. н.}}; & (5.17) \\ \tau_{\text{н}} &= (319,239 - (20 + 273)) / 319,239 = 0,082; \end{aligned}$$

– эксергия, отданная низкопотенциальным теплоносителем в испарителе  $e_{\text{н}}$ , кДж/кг:

$$\begin{aligned} e_{\text{н}} &= \tau_{\text{н}} \cdot q_{\text{н}}; & (5.18) \\ e_{\text{н}} &= 0,082 \cdot 202,5 = 16,644. \end{aligned}$$

– средняя логарифмическая температура горячего теплоносителя,  $T_{\text{ср. в}}, \text{K}$ ;

$$T_{\text{ср. в}} = (t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}) / (\ln(t_{\text{в2}} + 273) / (t_{\text{в1}} + 273)); \quad (5.19)$$
$$T_{\text{ср. в}} = (100 - 20) / (\ln(100 + 273) / (20 + 273)) = 331,392.$$

– эксергетическая температура высокопотенциального теплоносителя,  $\tau_{\text{в}}$ :

$$\tau_{\text{в}} = (T_{\text{ср. в}} - (t_0 + 273)) / T_{\text{ср. в}}; \quad (5.20)$$
$$\tau_{\text{в}} = (331,392 - (20 + 273)) / 331,392 = 0,116;$$

– эксергия, полученная высокопотенциальным теплоносителем в конденсаторе:

$e_{\text{в}}, \text{кДж/кг}$ :

$$e_{\text{в}} = \tau_{\text{в}} \cdot q_{\text{к}}; \quad (5.21)$$
$$e_{\text{в}} = 0,116 \cdot 267,663 = 31,009 \text{ кДж/кг};$$

– эксергия электроэнергии, потребляемой электродвигателем:  $e_{\text{э}}, \text{кДж/кг}$ ;

$$e_{\text{э}} = W = I_{\text{сж}} / (\eta_{\text{э.м}} \cdot \eta_{\text{э}}); \quad (5.22)$$
$$e_{\text{э}} = 85,741;$$

– эксергетический КПД теплового насоса  $\eta_{\text{э}}$ :

$$\eta_{\text{э}} = e_{\text{вых}} / e_{\text{вх}} = e_{\text{в}} / (e_{\text{н}} + e_{\text{э}}); \quad (5.23)$$
$$\eta_{\text{э}} = 31,009 / (16,644 + 85,741) = 0,303.$$

Массовый расход хладагента,  $\text{кг/с}$ :

$$G_{\text{ха}} = Q_{\text{тн}} / q_{\text{тн}} = 2942,44 / 267,663 = 10,99. \quad (5.24)$$

Полная нагрузка узлов теплового насоса:

– в компрессоре, кВт:

$$N = W \cdot G_{\text{ха}} = 85,741 \cdot 10,99 = 942,56; \quad (5.25)$$

– в испарителе, кВт:

$$Q_{\text{и}} = q_{\text{и}} \cdot G_{\text{ха}} = 202,5 \cdot 10,99 = 2226,1; \quad (5.26)$$

– в конденсаторе, кВт:

$$Q_{\text{к}} = q_{\text{к}} \cdot G_{\text{ха}} = 267,663 \cdot 10,99 = 2942,44; \quad (5.27)$$

Удельные эксергетические потери в компрессоре:

– внешние эксергетические потери в компрессоре и электродвигателе, вызванные механическим трением, кДж/кг:

$$\Delta e_{\text{внеш}} = W - l_{\text{сж}} = 942,56 - 921,98 = 20,578. \quad (5.28)$$

Эксергетические потери в теплообменниках определяются по разности эксергии хладагента, определяемой по формуле  $\Delta h - T_0 \Delta S$ , и эксергии, подведенной или отобранной у теплоносителя, равной  $\tau_q$ . Таким образом, определив энтропии по таблицам свойств фреона в состоянии насыщения или по  $p, h$ -диаграмме, получаем:

– эксергетические потери в испарителе, кДж/кг:

$$S_1 = 1,98;$$

$$S_2 = 1,89;$$

$$S_3 = 1,38;$$

$$S_4 = 1,47.$$

$$\Delta e_{\text{и}} = e_{\text{и}} - [q_{\text{и}} - t_0 \cdot (S_1 - S_4)] = 16,644 - [202,5 - 20 \cdot (1,98 - 1,47)] = -175,656; \quad (5.29)$$

– эксергетические потери в конденсаторе, кДж/кг:

$$\Delta e_k = [q_k - t_0 \cdot (S_2 - S_1)] - e_b = [267,663 - 20 \cdot (1,89 - 1,98)] - 20,578 = 226,454; \quad (5.30)$$

– сумма эксергетических потерь в тепловом насосе, кДж/кг:

$$\Sigma \Delta e = \Delta e_{\text{внеш}} + \Delta e_n + \Delta e_k = 20,578 + (-175,656) + 226,454 = 71,736. \quad (5.31)$$

Проверка расчета производится по равенству полученных эксергетических потерь и разности эксергии на входе и выходе теплового насоса, кДж/кг [65]:

$$\Sigma \Delta e_1 = (e_n + e_3) - e_b = (16,644 + 85,741) - 20,578 = 71,736. \quad (5.32)$$

Осуществлен подбор фреона, удовлетворяющего требованиям производства. Рассмотрены несколько вариантов и выбран фреон марки R600. По результатам расчетов, установка теплонасосной установки выгодна, с энергетической точки зрения ( $\text{ПЭ} < 1$ ) [66, 67]. Результаты проведенного расчета представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Термодинамический расчет схемы парокомпрессионного теплового насоса для промышленных объектов

Рассчитываемый параметр	Ед. изм.	Значение
Температура испарения фреона	°С	69
Энтальпия фреона после испарителя $h_1$	кДж/кг	687,5
Давление фреона в испарителе $p_n$	МПа	1,2
Температура конденсации фреона $t_k$	°С	105
Энтальпия фреона после конденсатора $h_3$	кДж/кг	485
Давление конденсации фреона $p_k$	МПа	2,3
Энтальпия фреона после адиабатного сжатия $h_{2a}$	кДж/кг	737
Адиабатный КПД компрессора $\eta_a$	–	0,76
Энтальпия фреона после компрессора $h_2$	кДж/кг	752,663
Энтальпия фреона перед испарителем $h_4$	кДж/кг	485
Удельная тепловая нагрузка испарителя $q_n$	кДж/кг	202,5



Рассчитываемый параметр	Ед. изм.	Значение
Удельная тепловая нагрузка конденсатора $q_k$	кДж/кг	263,663
Удельная тепловая нагрузка теплового насоса $q_{тн}$	кДж/кг	267,663
Работа сжатия в компрессоре $l_{сж}$	кДж/кг	65,163
Удельная энергия, потребляемая электродвигателем $W$	кДж/кг	85,741
Проверка теплового баланса	–	267,663
Коэффициент сжатия $\varepsilon$	–	1,917
Коэффициент преобр. теплоты, $\mu$	–	4,108
Коэффициент преобразования электроэнергии $\mu_э$	–	3,122
Удельный расход первичной энергии ПЭ	–	0,843
Средняя температура низкопотенциального теплоносителя $T_{ср. н}$	К	319,239
Термодинамическая температура низкопотенциального теплоносителя $t_n$	–	0,082
Эксергия, отданная низкопотенциальным теплоносителем $e_n$	кДж/кг	16,644
Средняя температура высокопотенциального теплоносителя в конденсаторе $T_{ср. в}$	К	331,392
Термодинамическая температура высокопотенциального теплоносителя в конденсаторе $t_v$	–	0,116
Эксергия, полученная высокопотенциальным теплоносителем в конденсаторе $e_v$	кДж/кг	31,009
Эксергия потребляемой электроэнергии, $e_э$	кДж/кг	85,741
Эксергетический КПД $\eta_э$	–	0,303

### 5.3 Оценка термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги с включением системы рекуперации теплоты отработанного воздуха сушильных установок

На основе выбранных потоков из таблицы с результатами термодинамического анализа (таблица 5.5) для участка производства бумаги выбраны 3 перспективных места, где теряемую энергию можно использовать в системе преобразования вторичной энергии с включением теплового насоса.

А именно:

- в технологическом процессе сушки (сушка бумаги в бумагоделательной машине);
- в технологическом процессе разделения (получение спирта при производстве бумаги);
- на сточных водах производства бумаги.

На рис. 5.1 – 5.3 изображена технологическая схема производства бумаги с указанием 3 мест установки теплонасосной установки.

Таблица 5.5

Результаты термодинамического анализа участка производства бумаги

№ потока	Тепловая мощность, отведенная	Эксергетическая мощность, отведенная	Тепловая мощность, отдаваемая сбросным потоком в утилизационном аппарате (полезно используемая)	Эксергетическая мощность, отдаваемая сбросным потоком в утилизационном аппарате (полезно используемая)	Расход получаемого энергоносителя в утилизационном аппарате	Энтальпия производимого энергоносителя в утилизационном аппарате	Вид ВЭР
	Q2, кВт	E(q)2, кВт	$\Delta Q = Q2 - Q3$ , кВт	$\Delta E(q) = E2 - E3$ , кВт	G4, кг/с	i4, кДж/кг	
117	13728,16	2749,59	10695,34	2589,15	28,52	100,50	теплый воздух
197	663,47	45,64	264,77	31,11	1,99	230,51	сточные воды
253	1357,14	237,95	1357,14	237,95	6,73	242,92	поток, нагретый верхним продуктом

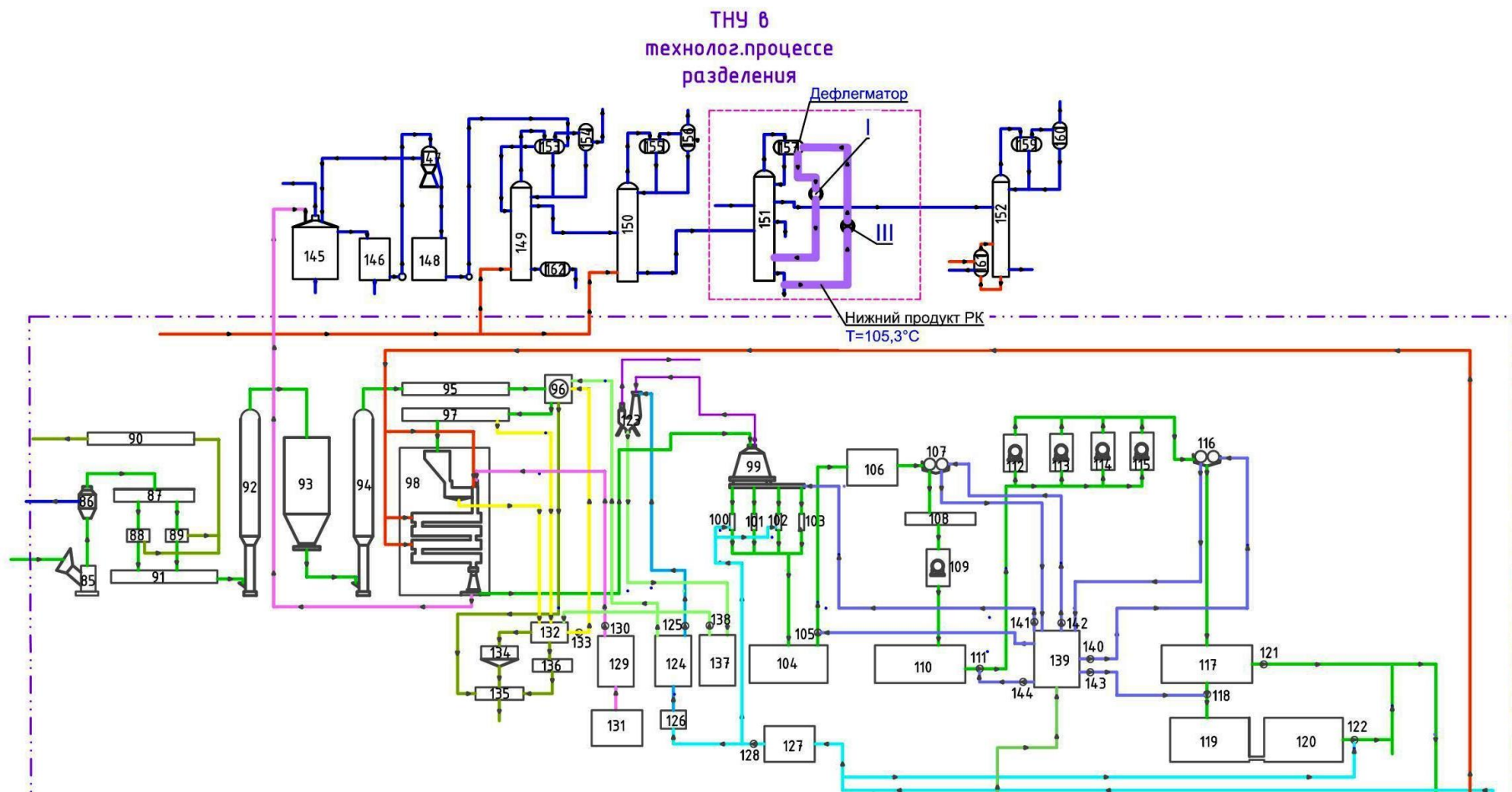


Рис. 5.1 Энерготехнологический комплекс производства бумаги с включением ТНУ

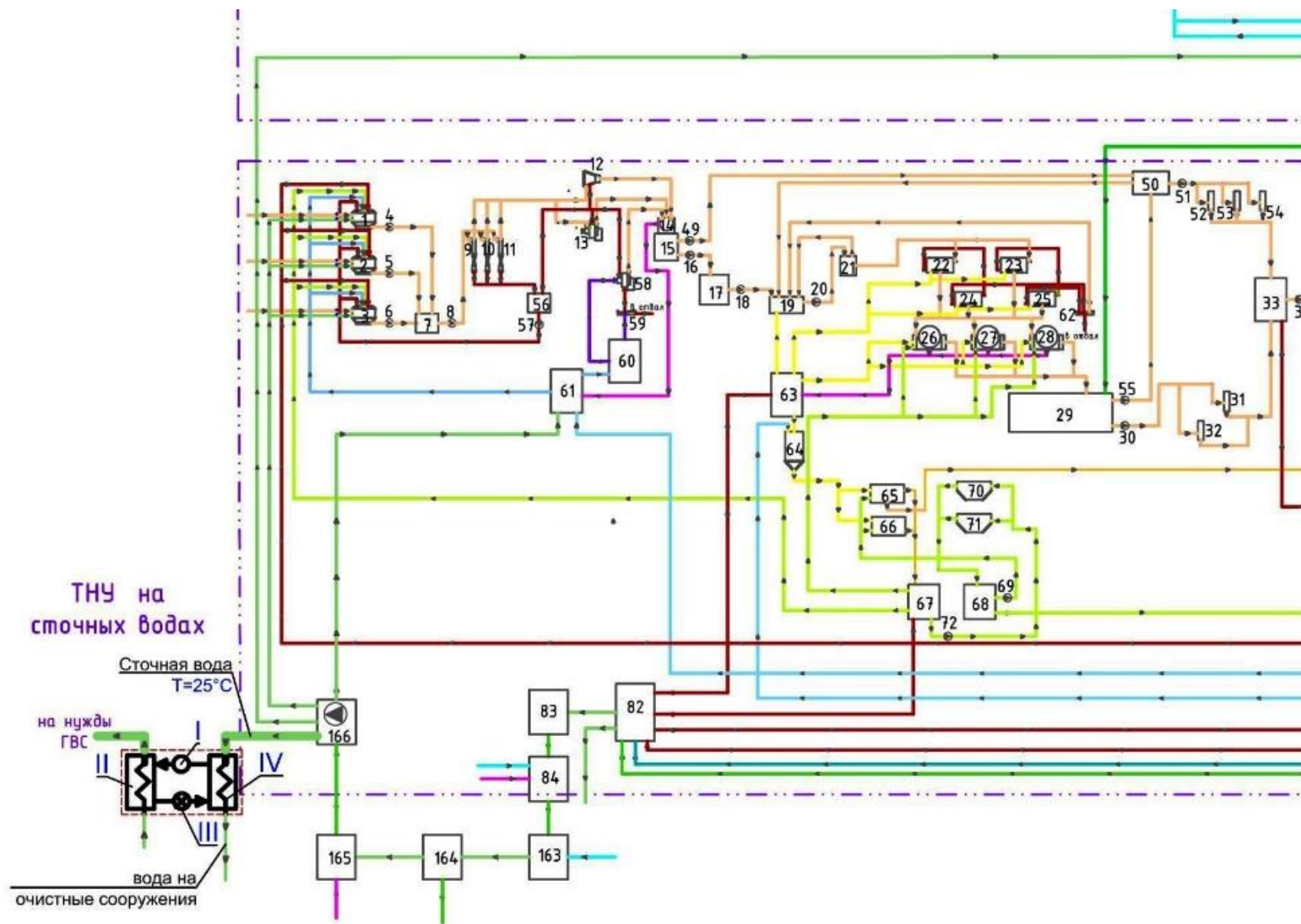


Рис. 5.2 Энерготехнологический комплекс производства бумаги с включением ТНУ (продолжение)

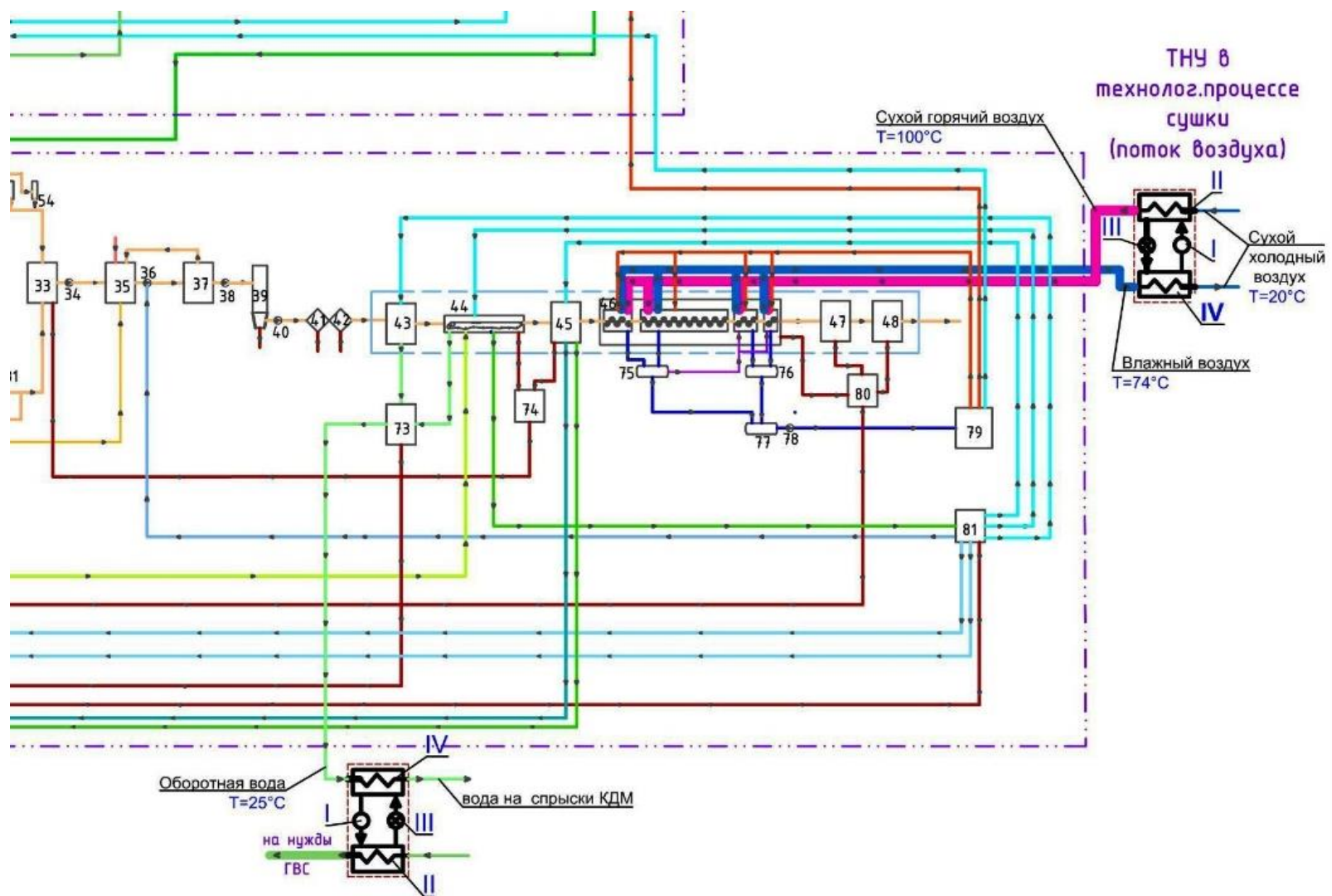


Рис. 5.3 Энерготехнологический комплекс производства бумаги с включением ТНУ (продолжение)

Включение теплового насоса для утилизации теплоты отработанного влажного воздуха сушильной части бумагоделательной машины (рис. 5.4) позволяет довести параметры влажного воздуха до требуемых параметров греющего сухого воздуха. Влажный воздух охлаждается в испарителе теплового насоса, где одновременно с процессом охлаждения происходит удаление выпавшей влаги. В таблице 5.6 представлено изменение параметров воздуха в процессе утилизации тепла теплонасосной установкой. Как мы видим, ТНУ позволяет довести параметры отработанного влажного воздуха с  $t=74\text{ }^{\circ}\text{C}$  до требуемых параметров сухого греющего воздуха с  $t=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

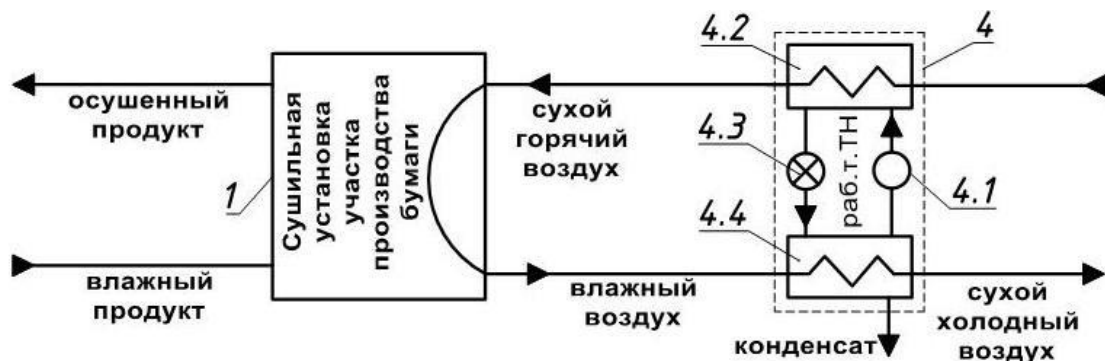


Рис. 5.4 Вариант модернизации системы с использованием теплового насоса в технологическом процессе сушки (сушка бумаги в бумагоделательной машине)

Таблица 5.6

Параметры потоков в точках процесса передачи эксергии при подключении ТНУ в технологический процесс сушки

Установка	Точки	Параметры		
		P, МПа	t, °C	h, кДж/кг
ТН в процессе сушки	t I	1,2	69	687,5
	t II	2,3	110	752,663
	t III	2,3	105	485
	t IV	1,2	15	485
	T 1	0,3	20	527,3
	T2	0,3	110	650,15
	T3	0,3	74	2312,59
	T4	0,3	40	527,3

Производство спирта сопровождается выходом большого количества теплой воды после конденсации водно-спиртовых паров в дефлегматорах. В процессах разделения при производстве спирта вариантом включения теплового насоса является использование энергии верхнего продукта колонн для подогрева нижней части (рис. 5.5). В результате включения теплового насоса в схему производства спирта возможно снижение затрат энергии на разделение до 75 %. В таблице 5.7 представлено изменение параметров воды в процессе утилизации тепла теплонасосной установкой.

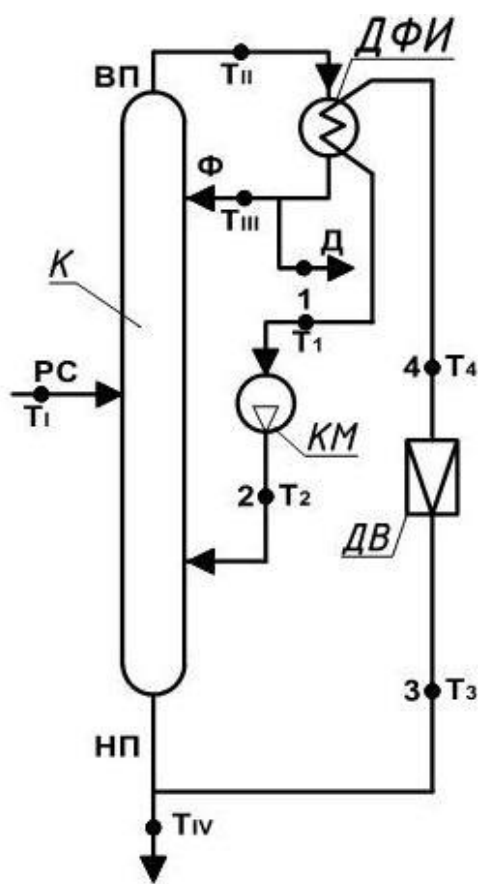


Рис. 5.5 Вариант модернизации системы с использованием теплового насоса в технологическом процессе разделения (получение спирта при производстве бумаги)

Таблица 5.7

Параметры потоков в точках процесса передачи эксергии при подключении ТНУ в технологический процесс разделения продуктов

Установка	Точки	Параметры		
		P, МПа	t, °C	h, кДж/кг
РК+ТН открытого типа	Т I	0,0143	53,2	159,16
	Т II	0,154	73,15	801,09
	Т III	0,107	64,9	210,16
	Т'III	0,107	64,9	649,94
	Т IV	0,1002	99,7	649,94
	Т 1	0,107	59,9	1259,342
	Т2	0,321	110	1371,886
	Т3	0,321	99,7	570,9
	Т4	0,107	59,9	570,9

Включение теплового насоса 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. 5.6, таблица 5.8). Прогоняя через ТНУ теплоноситель с  $t=34\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на выходе можно получить не менее  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволит сократить затраты на собственные нужды производства.

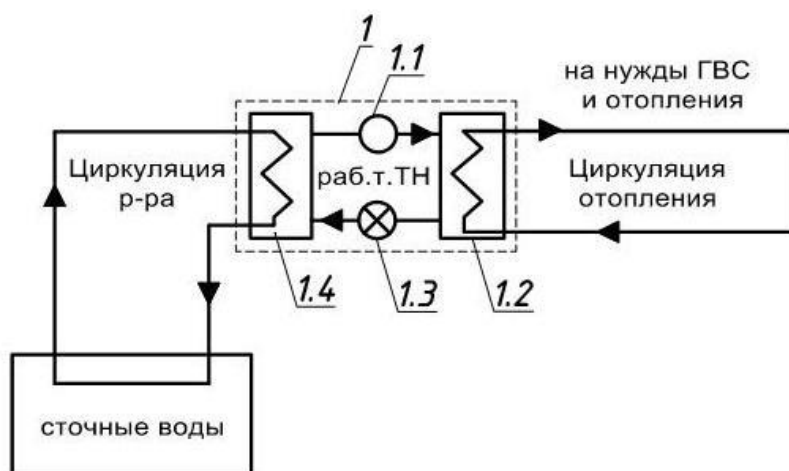


Рис. 5.6 Вариант модернизации системы с использованием теплового насоса на сточных водах производства бумаги



Таблица 5.8

Параметры потоков в точках процесса передачи эксергии при  
подключении ТНУ на сточные воды.

Установка	Точки	Параметры		
		P, Па	t, °C	h, кДж/кг
ТН на сточных водах	t I	0,38	34	500
	t II	2,12	64	559
	t III	2,12	38	350
	t IV	0,38	34	350

Сравнительный анализ 3-х вариантов подключения теплоутилизационных установок (таблица 5.9) показывает, что вариант включения ТН в ректификационную установку (вариант 2) предпочтительнее: у этого варианта выше и коэффициент трансформации, и эксергетический КПД.

Таблица 5.9

Сравнительная характеристика 3-х вариантов включения ТН в процесс  
разделения

Варианты	1	2	3
Источник ВЭР	Оборотная вода	Тепло конденсации верхнего продукта разделительных колонн	Тепло отработанного в технологии воздуха
Температура источника ВЭР, °C	34-38	64-73	40-74
Потребитель ВЭР	Горячее водоснабжение	Технологические процессы	Технологические процессы
Температура нагреваемого потока, °C	55	110	110
Схема ТН	Парокомпрес- сионный закрытого типа	Парокомпрес- сионный открытого типа	Парокомпрес- сионный закрытого типа
Коэффициент трансформации $\mu$	3,06	5,12	2,85
Эксергетический КПД $\eta_{\text{э}}$	0,15	0,52	0,303

Таким образом, в результате оценки термодинамического потенциала потоков с наибольшей эксергетической мощностью выявлено, что наиболее эффективной ТНУ является ТНУ открытого типа, в данном случае устанавливаемая на ректификационной колонне. Однако с учетом расходов ВЭР и возможности установки ТНУ на действующем, а не проектируемом предприятии, наиболее приемлемым вариантом является ТНУ для выработки горячего воздуха с температурой 110°С за счет использования теплоты отработанного в сушильной установке влажного воздуха температурой 74 °С.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луканин, П. В. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП / П. В. Луканин, В. Г. Казаков, Л. О. Зверев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 178-191. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191. – EDN ZOGYOD.,
2. Луканин, П. В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий / П. В. Луканин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 3-11. – DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11. – EDN WOZNTV.
3. Анисимова В.Ю., Тюкавкин Н.М. Энергосбережение и энергоэффективность в промышленности региона: монография. – Самара: Самарама, 2022. – 123 с.
4. Курбатов Ю.Л, Бирюков А.Б, Гнитиев П.А: Вторичные энергоресурсы и энергосберегающие технологии в промышленности. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. - 196 с.
5. Plotnikova, Lyudmila & Vankov, Yury & Chilikova, Irina. (2024). System Analysis of Pulp and Paper Production in the Development of Schemes for the Generation and Transformation of Secondary Energy Resources. 1-6. 10.1109/REEPE60449.2024.10479841.
6. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности: научное издание. – М.: МЭИ, 2001. - 364 с.
7. Рекуперация и аккумулялирование вторичных энергетических ресурсов на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса / Ю. В. Ваньков, Л. В. Плотникова, Ш. Г. Зиганшин, А. Р. Загретдинов. – Санкт-Петербург : Издательство «Научноемкие технологии», 2024. – 142 с. – ISBN 978-5-907804-20-3. – EDN QDKPAB.
8. Додонов, В. А. Теплонасосные установки на целлюлозно-бумажных предприятиях / В. А. Додонов, Л. В. Плотникова // Тинчуринские чтения :

Тезисы докладов XIII молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 24–27 апреля 2018 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 171-172. – EDN ZARTEL.

9. Санников В.А. Вторичные энергетические ресурсы целлюлозно-бумажной промышленности. – М.: Лесная промышленность, 1983. 215 с.

10. Закиров, Д. Г. Проблемы энергоэффективности на крупных энергоемких предприятиях и пути их решения / Д. Г. Закиров, А. А. Рюмкин, М. А. Мухамедшин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 5(127). – С. 19-25. – EDN PXXHZE.

11. Плотникова, Л. В. Структурный анализ теплотехнологического комплекса производства бумаги ОАО "Полиграфкартон" / Л. В. Плотникова, И. И. Чиликова, В. А. Додонов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4(43). – С. 29. – EDN YJKRIB.

12. Красавина, Е. О. Энергосберегающий тепловой насос в системах промышленного разделения веществ / Е. О. Красавина, Л. В. Плотникова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2016. – № 4(32). – С. 95-105. – EDN ZAOUNR.

13. Музюкова, Д. С. Анализ термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги / Д. С. Музюкова // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика : Материалы конференции. В 3-х томах, Казань, 07–08 декабря 2021 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 153-155. – EDN ANGUYN.

14. Папин, В. В. Эксергетический анализ отопительного режима тригенерационного энергокомплекса на базе нового трансформатора теплоты / В. В. Папин, Р. В. Безуглов // Строительные материалы и изделия. – 2023. – Т. 6, № 4. – С. 58-68. – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-4-58-68. – EDN MIFCBA.

15. Юшкова, Е. А. Эксергетический пинч-анализ системы теплообмена в технологии переработки нефти / Е. А. Юшкова, В. А. Лебедев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 5-11. – DOI 10.14529/power200101. – EDN NNHLEC.
16. Тепловые насосы : Учебно-методическое пособие / А. Б. Сулин, Ю. Н. Кропис, Т. В. Рябова [и др.] ; Национальный исследовательский университет ИТМО. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2022. – 76 с. – EDN JRYVGD.
17. Янтовский Е.И., Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 128 с.
18. Эстрин, И. А. Перспективы снижения энергопотребления в технологии оксида цинка / И. А. Эстрин // Тепловые процессы в технике. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 35-41. – DOI 10.34759/tpt-2022-14-1-35-41. – EDN MKWQHH.
19. Разработка и расчет энергетической эффективности тепловых насосов, работающих на зеотропных углеводородных смесях и предназначенных для сушки различных материалов / А. Л. Шурайц, Д. А. Коробченко, А. П. Усачев, А. В. Рулев // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 3. – С. 62-72. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-84-3-62-72. – EDN FUPMKS.
20. Шелгинский, А. Я. Энергосбережение в производстве аммофоса на основе эффективного использования тепловых ВЭР-технологий / А. Я. Шелгинский, А. Г. Звончевский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 4. – С. 24-34. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.4.024-034. – EDN DZYIGO.
21. Утилизация тепловой энергии вентиляционно-отопительных систем животноводческих помещений / С. С. Трунов, А. В. Хименко, Д. А. Тихомиров [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – Т. 69, № 2(47). – С. 65-73. – DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-65-73. – EDN DVHSPQ.

22. Федюхин, А. В. Перспективные направления использования теплоты низкопотенциальных источников химических производств / А. В. Федюхин, А. Г. Звончевский // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 15-27. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27. – EDN YECCYV.
23. Гетман, В. В. Применение теплонасосных установок для утилизации теплоты вторичных энергетических ресурсов / В. В. Гетман // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 9. – С. 233-236. – EDN SFMKXB.
24. Прищепова С.А., Султангузин И.А., Алимгазин А.Ш., Евсеенко И.В., Федюхин А.В., Бартнев А.И., Яворовский Ю.В. Использование низкотемпературных ВЭР с применением трансформаторов теплоты в цветной металлургии // Надежность и безопасность энергетики. 2020. № 13(2). С. 97–104. doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-2-97-104.
25. Chung T.D., Hong W.T., Chyou Y.P., Yu D.D., Lin K.F., Lee C.H. Efficiency analyses of solid oxide fuel cell power plant systems Applied // Thermal Engineering. 2008. Vol. 28(8-9). pp. 933-941.
26. Разработка и расчет энергетической эффективности тепловых насосов, работающих на зеотропных углеводородных смесях и предназначенных для сушки различных материалов / А. Л. Шурайц, Д. А. Коробченко, А. П. Усачев, А. В. Рулев // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 3. – С. 62-72. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-84-3-62-72. – EDN FUPMKS.
27. Kazakov V.G., Gromova E.N. Closed cycle of air-steam mixture the drying section of paper machine // Power engineering: research, equipment, technology. 2019. №3. pp. 24-31.
28. Шелгинский А.Я. Анализ эффективности использования теплонасосных установок открытого типа с электроприводом в производстве экстракционной фосфорной кислоты // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 6, С. 13 – 17.

29. Альмохаммед, О. А. М. Применение теплового насоса для дистилляции воды / О. А. М. Альмохаммед, Н. Ф. Тимербаев, И. Ю. Мазаров // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 3(43). – С. 57-66. – EDN JRXGQE.
30. Дзино А.А., Малинина О.С. Абсорбционные холодильные машины: - СПб.: Университет ИТМО, 2015. - 68 с.
31. Оценка энергетической эффективности применения абсорбционных трансформаторов теплоты на газоперекачивающих агрегатах / П. А. Шомов, А. И. Бартнев, И. А. Султангузин [и др.] // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2023. – № 2. – С. 118-124. – DOI 10.24160/1993-6982-2023-2-118-124. – EDN GGIXDJ.
32. Повышение эффективности парогазовой установки с котлом-утилизатором за счет включения в схему абсорбционного преобразователя теплоты / Р. Н. Валиев, Ш. Г. Зиганшин, Ю. В. Ваньков, Р. Р. Гарипов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 11-12. – С. 101-111. – EDN YTZTXG.
33. Организация системы преобразования вторичной тепловой энергии с использованием теплонасосного оборудования для нефтегазоперерабатывающего предприятия Восточной нефтяной компании / Л. В. Плотникова, И. И. Чиликова, Р. Н. Валиев [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2018. – № 11. – С. 86-90. – EDN VMMBYU.
34. Островский Г.М., Бережинский Т.А. Оптимизации химико-технологических процессов. М.: Химия, 1984. 239 с.
35. Островский Г.М., Бережинский Т.А., Беляева А.Р. Алгоритмы оптимизации химико-технологических процессов. М.: Химия, 1978. 294 с.
36. Оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Г. Б. Левенталь, Л. С. Попырин ; Под ред. акад. М. А. Стыриковича. - Москва : Энергия, 1970. - 349 с.
37. Плотникова, Л. В. Программное обеспечение системного анализа сложноструктурированных промышленных комплексов при разработке энергосберегающих мероприятий / Л. В. Плотникова, Ю. В. Торкунова //

Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 1(53). – С. 140-154. – EDN LSVQSA.

38. Кафаров, В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин; М.: Химия, 1991. 432 с.

39. Кафаров, В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.П. Мешалкин; М.: Химия, 1974.-344 с.

40. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / Кафаров В.В., Дорохов И.Н. – М.: Наука, 1976.

41. Г.М. Островский. Ю.М. Волин. Методы оптимизации сложных химико-технологических систем. – М.: Химия, 1970. – 328 с.

42. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.

43. Тимофеев В.С. Системные закономерности в технологии основного органического синтеза. – М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1981. – 107 с.

44. Холоднов В.А., Викторов В.К., Таганов И.Н. Математическое моделирование сложных химико-технологических схем. Л.: Ленуприздат, 1977. – 74с.

45. Программная реализация системного анализа сложноструктурированной химико-технологической схемы нефтехимического производства / Л. В. Плотникова, А. А. Звегинцев, Л. А. Кашипова [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 8. – С. 198-202. – EDN TVQWYH.

46. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 323 с.

47. Information model of the structure of the heat and power system of pulp and paper production and a systematic approach to its improvement. L.V. Plotnikova, I.I. Chilikova, E.V. Khramova, V.V. Plotnikov. E3S Web Conf. 124 05035 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201912405035.



48. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий: учебное пособие. – М.: МЭИ, 2002. - 407 с.
49. 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.
50. Шатихин Л.Г. Структурные матрицы и их применение для исследования систем. – М.: Машиностроение, 1991.
51. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984.
52. Приемы системного анализа и ресурсосберегающие электромембранные технологии при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики Республики Татарстан / А. А. Чичиров, А. А. Филимонова, Н. Д. Чичирова, А. И. Минибаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 66-82. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-66-82. – EDN НОВГJK.
53. Путилин, С. С. Использование математических моделей и методов системного анализа для оптимизации управления работой аммиачной холодильной установки / С. С. Путилин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3(23). – С. 033-042. – EDN RNKHGL.
54. Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев и др. Киев: Наук. думка, 1991.
55. Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.Б. Эксергетический анализ работы промышленных установок. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2000. – 297 с.
56. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – М.: Энергия, 1968.
57. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973.
58. Бродянский В.М., Фраштер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

59. Ноздренко Г.В., Щинников П.А. Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭС с новыми технологиями: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 190 с.
60. Химическая энергия и эксергия веществ / Степанов В.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 163 с.
61. Повышение теплоэнергетической эффективности тепловой схемы паровой котельной / Р. Н. Валиев, Ш. Г. Зиганшин, Е. Е. Костылева [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10, № 1(37). – С. 45-54. – EDN XSFUOL.
62. Валиев Р.Н., Назмеев Ю.Г. Анализ термодинамической эффективности теплотехнологической схемы дегидрирования изоамиленов в изопрен в производстве синтетического изопренового каучука СКИ-3. Часть 1 // Проблемы энергетики, 2001, № 1 – 2. – С. 37 – 53.
63. Валиев Р.Н., Назмеев Ю.Г. Анализ термодинамической эффективности теплотехнологической схемы дегидрирования изоамиленов в изопрен в производстве синтетического изопренового каучука СКИ-3. Часть 2 // Проблемы энергетики, 2001, № 3 – 4. – С. 49 – 57.
64. Данилов О.Л., Мунц В.А. Использование вторичных энергоресурсов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 154 с.
65. Комбинирование вторичных и возобновляемых источников энергии в гибридном теплонасосном комплексе / В. В. Папин, Р. В. Безуглов, Н. Н. Ефимов [и др.] // Энергетик. – 2022. – № 7. – С. 14-18. – EDN WRVVOК.
66. Закиров, Д. Г. Проблемы энергоэффективности на крупных энергоемких предприятиях и пути их решения / Д. Г. Закиров, А. А. Рюмкин, М. А. Мухамедшин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 5(127). – С. 19-25. – EDN PXXHZE.
67. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов / М. А. Таймаров, В. К. Ильин, А. Л. Осипов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, № 3-4. – С. 8-16. – DOI 10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-8-16. – EDN JYPR LH.