

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 658.26:681.5.015

**МУСЛИНА**  
**Дарья Борисовна**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ  
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕКСТИЛЬНЫХ  
И ТРИКОТАЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Автореферат**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика**

Минск 2016

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

**Романюк Владимир Никанорович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

**Трифонов Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – СОСНЫ Национальной академии наук Беларуси»;

**Молочко Федор Иванович**, кандидат технических наук, главный специалист отдела общей энергетики Научно-исследовательского и проектного республиканского унитарного предприятия «БЕЛТЭИ»

Оппонирующая организация:

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «25» мая 2016 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, e-mail: [pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by), телефон ученого секретаря (017) 293-92-16.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «21» апреля 2016 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций

кандидат химических наук, доцент



О. Ф. Краевская

© Муслина Д.Б., 2016

© Белорусский национальный технический университет, 2016

## ВВЕДЕНИЕ

В свете снижения энергоемкости валового внутреннего продукта (ВВП) и необходимости обеспечения энергобезопасности республики, подъема экономики одним из определяющих путей является повышение энергоэффективности промышленного производства, что весьма актуально также для легкой промышленности. Легкая промышленность занимает важное место в индустриальном секторе народнохозяйственного комплекса Беларуси: до 40 % внутреннего товарооборота непродовольственных товаров страны приходится на продукцию отрасли, при этом экспорт составляет около половины общего объема ее производства. За последние 15 лет положение текстильных и трикотажных предприятий Беларуси и стран СНГ заметно ухудшилось, что связано с постепенной потерей конкурентоспособности их продукции, обусловленной рядом факторов, в том числе ее высокой себестоимостью. Одной из причин роста себестоимости является рост тарифов на энергоресурсы, затраты на приобретение которых достигают 30 % издержек производства против 5–10 % в странах Европейского союза (ЕС). Увеличенное значение энергетической составляющей себестоимости продукции определяется, во-первых, низкой эффективностью энергообеспечения текстильных и трикотажных предприятий: 84 % электроэнергии и 75 % тепловой энергии на нужды предприятий обеспечиваются за счет конденсационных электростанций (КЭС) и котельных, т. е. с использованием отдельных технологий их производства. При этом до 71 % потребляемой энергии расходуется в тепловой форме, что предопределяет требование перехода к современному энергоэффективному энергообеспечению производства, построенному на комбинированной выработке электроэнергии на теплотехнологическом потреблении. Во-вторых, непосредственно энергоиспользование внутри теплотехнологии на операции крашения, сушки, тепловой обработки текстильных материалов весьма несовершенно и это в том числе обуславливает высокую энергоемкость продукции. Так, в Беларуси она составляет более 91 ГДж/т, или 15 МДж/EUR произведенной продукции; в Германии – 80 ГДж/т и 7 МДж/EUR; в Колумбии – 74 ГДж/т и 12 МДж/EUR. Несовершенство энергоиспользования предприятий отрасли связано прежде всего с большим количеством неиспользуемых побочных тепловых ресурсов. Например, для Беларуси это более 7 млн т в год побочных жидких стоков в отрасли с температурой 40–50 °С. Подобная ситуация сохраняется и в мировой практике. Активно ведутся работы, направленные на снижение энергоемкости текстильной и трикотажной продукции, в ЕС, Турции, США и Японии. Однако они главным образом ориентированы на локальные мероприятия, связанные с подходом к улучшению использования энергии в отдельных установках, что является методологией прошлого. Требуется системный подход в контексте концепции интенсивного энергосбережения к анализу и разработке мероприятий по комплексному усовершенствованию и энергообеспечению, и энергоиспользованию.

Как показал анализ отечественных и зарубежных публикаций по теме работы, результаты исследований свидетельствуют об их незавершенности и, как следствие, нет практической реализации. Отсутствует термодинамический анализ и объективные количественные оценки эффективности технологических процессов энергообеспечения текстильных и трикотажных предприятий; детальное исследование процессов тепловой обработки технологических переделов, тепловых схем аппаратов, участков, производств и связанной с ними рекуперации тепловой энергии, не рассматривается ее внешнее использование и рациональное построение теплоэнергетической системы предприятия, которое признано наиболее плодотворным путем энергосбережения. Все это напрямую входит в предмет исследований представляемой работы и разработки реализуемых инновационных предложений и рекомендаций, а решение перечисленных задач имеет научную новизну, актуальность и важное практическое значение.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете в соответствии с планом НИР кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», утвержденным НТС БНТУ, в рамках проведения научных исследований и разработок по проекту «Утилизация побочных низкотемпературных тепловых потоков предприятий легкой промышленности» (ГБ 15-18, ГР № 20150343, 2015 г.). Тема диссертационной работы соответствует задачам, определенным: Перечнем приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585) по разделу «1. Энергообеспечение, энергосбережение, энергоэффективные технологии» и Перечнем приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190) по разделу «1. Энергетика»; Республиканской программой энергосбережения на 2011–2015 гг., утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24.12.2010 № 1882; Программой развития промышленного комплекса Республики Беларусь на период до 2020 г., утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 05.07.2012 № 622; Комплексной программой развития легкой промышленности Республики Беларусь на 2011–2015 гг. с перспективой до 2020 г.

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы – разработать научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности, позволяющее определить потенциал энергосбережения

на указанных предприятиях и повысить эффективность использования энерго-ресурсов.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи исследования:

1. Проанализировать состояние теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий и определить потенциал энергосбережения с учетом прогнозов изменения объемов энергопотребления.

2. Проанализировать методы количественной оценки эффективности теплоэнергетической системы промышленного предприятия. Разработать методику расчета концентрационной, реакционной, термомеханической составляющих эксергии текстильных и трикотажных материалов с использованием метода термодинамического анализа применительно к отделочному производству текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности.

3. Исследовать эффективность энергоиспользования теплотехнологическим оборудованием отделочных производств текстильных и трикотажных предприятий методом термодинамического анализа и определить объемы побочных тепловых потоков и пути их использования.

4. Разработать методику прогнозирования потребности текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности в энергоресурсах на основе прогнозной оценки динамики производства продукции на примере типового предприятия.

5. Разработать и внедрить научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий (ТЭСТП) легкой промышленности, обеспечивающее максимальную реализацию потенциала энергосбережения.

*Объект исследования* – теплоэнергетические системы текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности Республики Беларусь.

*Предмет исследования* – эффективность систем энергообеспечения и энергопотребления, тепловые схемы, процессы и аппараты теплотехнологической обработки материалов текстильных и трикотажных предприятий.

#### **Научная новизна:**

– Разработана методика определения эксергии текстильных и трикотажных материалов, *включающая* нахождение концентрационной, реакционной, термомеханической составляющих эксергии вещества в потоке, *учитывающая* влияние энергии связи кристаллизационной влаги с материалом и энергии адсорбции красителя текстильными материалами на составляющие эксергии вещества.

– Научно обоснована предельная величина рекуперации тепловой энергии побочных потоков в аппаратах крашения, *позволяющая* снизить их удельное энергопотребление на 50 % для аппаратов периодического действия и на 20 % для линий непрерывного крашения.

– Получены новые результаты по оценке термодинамической эффективности энергоиспользования технологическими аппаратами и энергообеспечения

текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности, *позволяющие* обосновать структурные изменения теплоэнергетических систем предприятий отрасли при их модернизации.

– Разработана методика прогнозирования потребления энергоресурсов текстильными и трикотажными предприятиями Беларуси и выбора мощности их собственных когенерационных источников на основе статистических моделей динамики объемов выпуска продукции.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика определения эксергии текстильных и трикотажных материалов включающая нахождение концентрационной, реакционной, термомеханической составляющих эксергии вещества в потоке, *отличающаяся* учетом влияния энергии связи кристаллизационной влаги с материалом и энергии адсорбции красителя текстильными материалами на составляющие эксергии вещества, *позволяющая* провести термодинамический анализ и получить количественную оценку эффективности энергообеспечения текстильных и трикотажных предприятий Беларуси.

2. Результаты термодинамического анализа использования энергоресурсов линиями крашения отделочных производств предприятий легкой промышленности, которые *показали* их низкую энергоэффективность и *позволили установить*, что применение рекуперации и утилизации, *включающее* перераспределение мощностей энергетических потоков теплотехнологических процессов путем аккумулирования тепловой энергии побочных потоков и ввода в теплоэнергетическую систему предприятия абсорбционных тепловых насосов, *приводит* к снижению удельного энергопотребления линий непрерывного крашения на 20 % и аппаратов периодического действия на 50 %.

3. Методика прогнозирования потребления энергоресурсов текстильными и трикотажными предприятиями, *отличающаяся* применением статистических моделей динамики объемов выпуска продукции отрасли и ее типового предприятия, и *позволяющая* обосновать рациональный выбор мощности собственных когенерационных энергоисточников.

4. Научно-методическое обеспечение структурных изменений теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий при их модернизации на основе совершенствования энергопотребления и энергообеспечения за счет аккумулирования энергии, многоступенчатости тепловой подготовки технологических потоков с расширением состава используемых теплоносителей, утилизации энергии побочных тепловых потоков с помощью абсорбционных тепловых насосов, а также совершенствования энергообеспечения за счет интеграции теплотехнологического и когенерационного оборудования, что *обеспечивает* снижение удельного потребления энергоресурсов на тонну условной продукции на 20 % (со 182 до 145 ГДж/т), или 1,1 т у. т.

**Личный вклад соискателя ученой степени**

Совместно с руководителем диссертационной работы доктором технических наук, профессором В.Н. Романюком определены цель и задачи исследова-

ний, а также опубликованы печатные работы. В написании статей по общим оценкам проблем энергосбережения и потенциала применения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов приняли участие академик НАН Беларуси Б.М. Хрусталеv, аспиранты БНТУ А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая, магистрант БНТУ Т.В. Бубыр.

Личный вклад соискателя заключается в: выполнении литературного анализа состояния вопроса; разработке методики определения эксергии текстильных и трикотажных материалов; термодинамическом анализе эффективности энергообеспечения линий и аппаратов крашения с привлечением энергетического, эксергетического метода и пинч-анализа и оценке эффективности мероприятий его совершенствования; разработке и внедрении структурной модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий; разработке технических, схемных и режимных решений полигенерации и рекуперации побочных тепловых потоков отделочных производств; анализе статистических данных и составлении методики прогнозирования потребления энергоресурсов на примере типового предприятия отрасли; составлении рекомендаций по повышению энергоэффективности производства текстильных и трикотажных предприятий.

#### **Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты исследований диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (МНТК) «Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности» (Витебск, 2011); Республиканской научно-практической конференции «Перспективы развития энергетики в XXI в.» (г. Минск, 2012); Белорусско-германском семинаре «Научно-техническое сотрудничество и трансфер технологий в сфере энергоэффективности и переработки отходов» (Минск, 2012–2013); XIII МНТК «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2013); XII МНТК «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики» (Саратов, 2014); МНТК «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2011, 2013–2014, 2016); МНТК «Актуальные вопросы энергетики восточноевропейского региона» (Минск, 2014); Белорусско-китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты-2014» (Минск, 2014); конференции аспирантов в Техническом университете г. Дрезден (Дрезден, 2014); конференции Kraftwerkstechnisches Kolloquium (Дрезден, 2013); конференции Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz (Берлин, 2014); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Екатеринбург, 2014); X МНТК «Энергия-2015» (Иваново, 2015).

Результаты диссертации использованы: в проектах и НИР кафедры «Горение и тепломассообмен» Технического университета г. Дрезден (Германия); в учебном процессе на кафедре ПТЭиТ БНТУ; при выполнении технико-экономических обоснований инвестирования проектов для ОАО «Гронитекс»,

ОАО «Барановичское производственное хлопчатобумажное объединение» (БПХО), ОАО «Купалинка». Для ОАО «БПХО» при участии соискателя реализован проект модернизации теплоэнергетической системы предприятия с установкой когенерационного комплекса.

#### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные положения диссертации опубликованы в 34 работах, в том числе 1 главе коллективной монографии, 18 статьях в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 15 публикациях в научно-технических журналах и материалах научно-практических конференций. Общий бъем публикаций – 13,3 авторского листа.

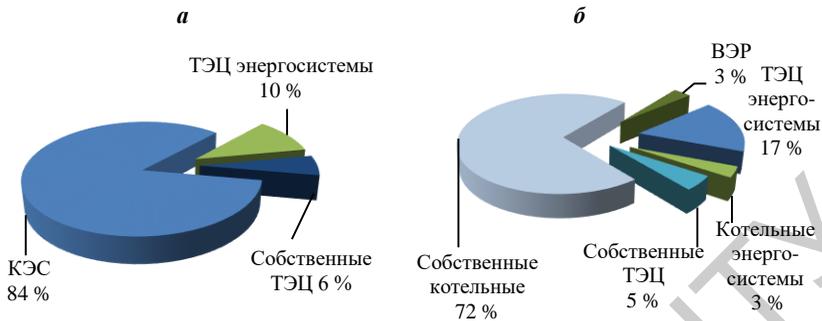
#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, перечня условных обозначений, общей характеристики, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации – 197 страниц, в том числе иллюстраций – 104, таблиц – 37, приложений – 7. Список использованных источников состоит из 202 наименований, из них иностранных – 77. Список публикаций автора – 34 наименования.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**В первой главе** рассмотрены состояние энергоиспользования и эффективность энергообеспечения текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности, значимость отрасли для Беларуси. Конкуренция обуславливает актуальность снижения энергетической составляющей себестоимости продукции, которая для текстильных и трикотажных предприятий полного цикла достигла 30 %. Требования к ее снижению определяют направление исследований работы.

Приведен анализ состояния теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности. Построены и проанализированы энергобалансы отечественных и зарубежных предприятий, показана их теплотехнологическая направленность – более 70 % энергопотребления реализуется в тепловой форме. В отрасли практически отсутствует рекуперация тепловой энергии (ТЭ), а утилизация энергии вторичных энергоресурсов незначительна [20, 28]. Определена структура генерируемых потоков электро- и тепловой энергии для энергообеспечения предприятий отрасли: 84 % электроэнергии (ЭЭ) вырабатывается КЭС. Основное количество ТЭ (75 %) обеспечивается котельными, при этом только 22 % потребления ТЭ используется для комбинированной генерации ЭЭ (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Структура генерации потоков электроэнергии (а) и тепловой энергии (б) для энергообеспечения легкой промышленности**

Рассмотрены теплотехнологии отделочных производств, линий и аппаратов непрерывного и периодического действия. Определены потенциал энергосбережения и пути его использования. Расчетно-аналитическим путем доказано, что за счет рекуперации и утилизации низкотемпературных потоков ТЭ с помощью абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН) годовой потенциал снижения потребления ТЭ по рассматриваемым предприятиям на текущий момент достигает 0,9 млн ГДж (0,03 млн т у. т.) [24, 30, 33].

Мероприятия по совершенствованию энергоиспользования реализуются в сочетании с комбинированной выработкой энергопотоков на тепловом потреблении предприятий. Определена интегральная по отрасли мощность комбинированной выработки ЭЭ [3, 20, 24]. В результате перехода к комбинированному энергообеспечению потенциал энергосбережения отрасли достигает 0,05 млн т у. т. в год.

Предложен комплексный подход к энергосбережению, в котором определены приоритеты мероприятий: рекуперация и утилизация ТЭ – более высокий приоритет, собственные энергоисточники – более низкий.

Исходя из изложенного, сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** исследованы методики интенсивного энергосбережения, термодинамического анализа (ТДА) на базе эксергетического метода и пинч-анализа. Объективная количественная оценка состояния энергообеспечения и энергоиспользования возможна на основе ТДА, наиболее эффективно реализуемого на основе эксергетического метода (ЭМ). Применение ЭМ связано с определением эксергии веществ технологических потоков отделочных производств, не рассмотренной в литературе, что требует разработки приложения ЭМ к проведению ТДА указанных теплотехнологий. В этой связи разработана методика расчета эксергии текстильных и трикотажных материалов на основе классических представлений о составляющих эксергии вещества, которая позволяет получить количественную оценку термодинамической эффективности

непосредственно теплотехнологии, аппаратов отделочного производства и энергообеспечения предприятий отрасли.

Эксергия в потоке вещества для окрашенного материала определяется тремя составляющими: реакционной, концентрационной, термомеханической. Их расчет представляет значительную методологическую трудность, поэтому в главе предложены пути ее преодоления. Текстильный материал состоит из неокрашенного сухого материала, красителя, равновесной влаги, изменяющейся в процессе обработки, а также текстильных вспомогательных веществ и химических реагентов, используемых в промежуточных стадиях отделки [1]. Состав сухого материала предлагается определять на массу материала, из которого удалена вся свободная и связанная влага, кроме гидратной (кристаллизационной), удалить которую без разрушения материала и химических связей в нем невозможно [12].

*Реакционная составляющая эксергии текстильного окрашенного материала* определяется соотношением

$$e_{r, \text{матер}} = \sum g_j \cdot e_{r, j}, \quad (1)$$

где  $g_j$  – массовые доли компонентов материала на сухую массу;  $e_{r, j}$  – реакционная, удельная массовая эксергия  $j$ -го компонента, определяемая из справочной литературы, кДж/кг.

Для нахождения  $e_{r, j}$  горючих компонентов применяется методика Шаргутта с использованием высшей теплоты сгорания сухого вещества  $Q_b^c$ , кДж/кг, что находится в соответствии с законом Гесса о независимости теплоты реакций от пути перехода из одного состояния в другое, в данном случае – из исходного в состояние, соответствующее окончанию реакций девальвации веществ:

$$e_{r, j} = (Q_b^c + rW^c) \alpha, \quad (2)$$

где  $r$  – теплота парообразования воды при атмосферном давлении, кДж/кг;  $W^c$  – влажность рабочей массы горючего компонента, определенная на сухую массу, массовые доли;  $\alpha$  – корреляционная поправка для твердых углеводородов, зависящая от состава.

*Концентрационная составляющая эксергии* относится к материалам, состав которых можно рассматривать в данном случае как «твердый раствор», а их разделение на компоненты связано с термодинамической работой, не зависящей от давления, температуры материала и влажности окружающей среды. Установлено, что поверхностно-активные вещества (ПАВ) и химические реагенты, используемые при крашении, не могут быть отнесены к концентрационной составляющей эксергии, поскольку вымываются из материала без затрат термодинамической работы [12]. Данное определение связи концентрационной составляющей эксергии с термодинамической работой для рассматриваемых материалов определяется энергией адсорбции красителя материалами. В расчетах концентрационной составляющей эксергии влажных материалов необходимо учитывать энергию связи кристаллизационной влаги с материалом.

В итоге предложена зависимость для расчета концентрационной составляющей эксергии в виде

$$e_{k, \text{матер}} = \sum_1^n (g_j w_j), \quad (3)$$

где  $n$  – число компонентов материала (материал, влага, краситель и пр.);  $g_j$  – массовый состав материала на сухую массу (для воды  $g_j$  – гидратная влажность материала);  $w_j$  – удельная энергия адсорбции красителя материалом или энергия химической связи гидратной влаги с материалом, кДж/кг, определяемые из справочников.

*Термомеханическая составляющая эксергии* потока материала определяется

$$e_{pT, \text{матер}} = \sum (g_j ((i_j - i_{j,0}) - T_0 (s_j - s_{j,0}) + l_j)), \quad (4)$$

где  $g_j$  – массовый состав на сухую массу ткани или пряжи в соответствии с соотношением (1);  $i_j, i_{j,0}$  – энтальпия компонентов вещества, кДж/кг;  $T_0$  – температура окружающей среды, К;  $s_j, s_{j,0}$  – энтропия компонентов вещества, кДж/(кг·К);  $l_j$  – энергия отрыва компонента от материала на килограмм компонента, зависящая от состояния окружающей среды, кДж/кг (для влаги определяется с учетом каждого вида связи с материалом).

Для определения энергии отрыва влажной компоненты используется методика Ребиндера

$$l_j = \sum_1^m l_k \cdot y_k, \quad (5)$$

где  $m$  – количество видов влаги в материале за исключением гидратной составляющей: адсорбционно-, осмотически-, капиллярно-связанная влага;  $l_k$  – энергия каждой связи влаги с материалом согласно литературным данным, кДж/кг;  $y_k$  – массовая доля каждого вида влаги в материале по отношению к влаге материала.

Приведен анализ структуры эксергии с учетом ее трансформации в процессе крашения на примере характерных материалов – хлопка и нейлона [12]. Для хлопка в расчетах принимался основной краситель – Chrysophenine G или Yellow 12 ( $C_{30}H_{26}N_4Na_2O_8S_2$ ), для нейлона – дисперсный краситель – азобензол ( $C_{12}H_{10}N_2$ ) (рисунок 2).

Выявлена неоднородность структуры эксергии текстильных и трикотажных материалов, удельные веса составляющих эксергии различаются на порядки, что диктует необходимость использования «транзитной эксергии» при проведении эксергетической оценки отделочного производства [1, 12]. При учете транзитных и располагаемых потоков эксергии в ходе технологической обработки составляющие эксергии, свободные от проходящих без изменения потоков, заглушающих количественную оценку процесса, получают значительно большую относительную значимость, удобную для использования.

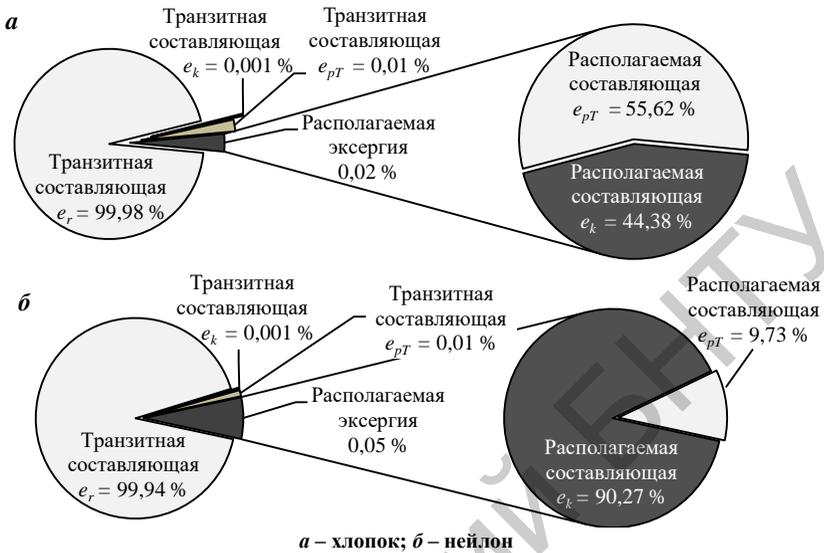


Рисунок 2. – Структура составляющих эксергии текстильных окрашенных материалов

В третьей главе проведен термодинамический анализ на базе ЭМ и пинч-анализа, получена количественная оценка эффективности энергопотребления технологических линий непрерывного крашения (ЛНК) и аппаратов периодического действия (АПД) [15, 16, 18]. В качестве типового оборудования непрерывного действия принята линия термозольного крашения (материал – х/б ткань). Оценка эффективности выполнена на базе абсолютных и относительных эксергетических характеристик, среди которых наиболее информативными определены: эксергетический КПД ( $\eta_e^{**}$ ), энергетический КПД ( $\eta_e$ ), удельные затраты энергии и эксергии на тонну обрабатываемого текстильного материала, внешние ( $D_e$ ) и внутренние потери эксергии ( $D_i$ ).

Получены результаты ТДА эффективности энергоиспользования в системах тепловой подготовки технологических потоков ЛНК и самих линий. Системы тепловой подготовки технологических потоков характеризуются энергетическим КПД (36 %), эксергетическим КПД (18 %). Этого в настоящее время недостаточно и требуется улучшение. В отношении технологической линии ситуация существенно хуже и связана непосредственно с особенностями технологического процесса: эксергетический КПД – 0,20 %, удельные затраты энергии – 10,2 ГДж/т, эксергии – 2,9 ГДж/т материала. Объемы неиспользуемых побочных потоков ЛНК на тонну ткани составляют 21 м<sup>3</sup> со средней температурой 50–60 °С. Для оценки возможности и получаемого эффекта их возврата в процесс тепловой обработки, установления границ рекуперации проведен пинч-анализ линии [15].

В энергетических и эксергетических расчетах используется диаграмма трансформации потоков эксергии ЛНК по каждой компоненте (материал, краситель, техническая вода и прочие потоки) для штатного режима, необходимая для представления изменений, происходящих в агрегате (рисунок 3).

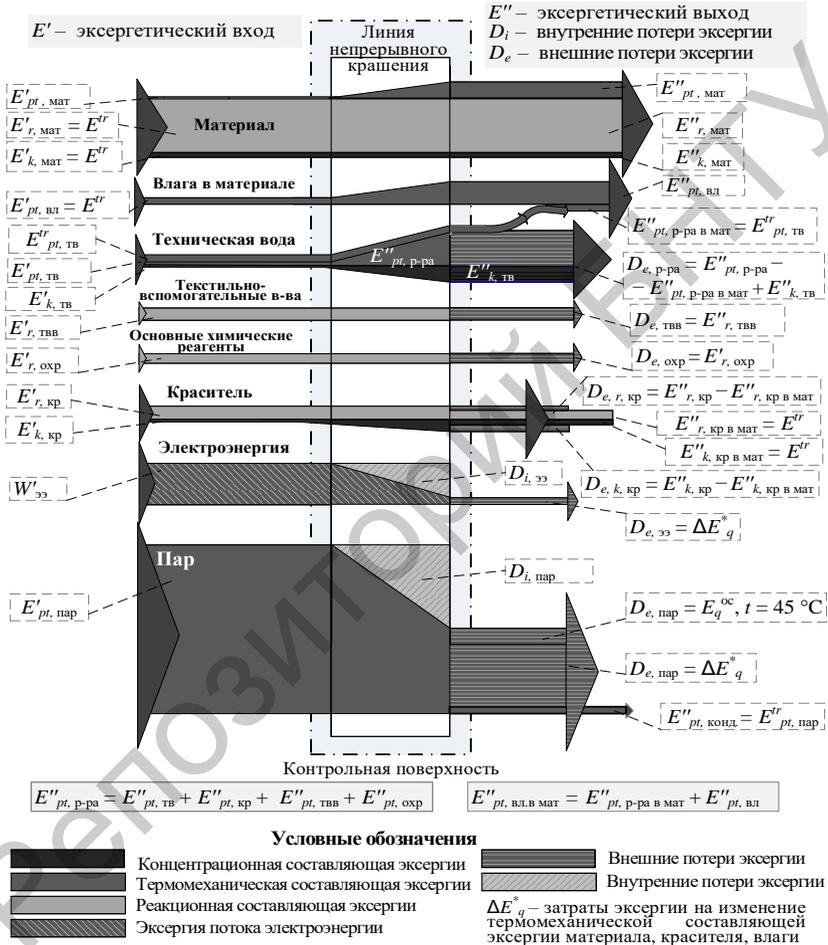
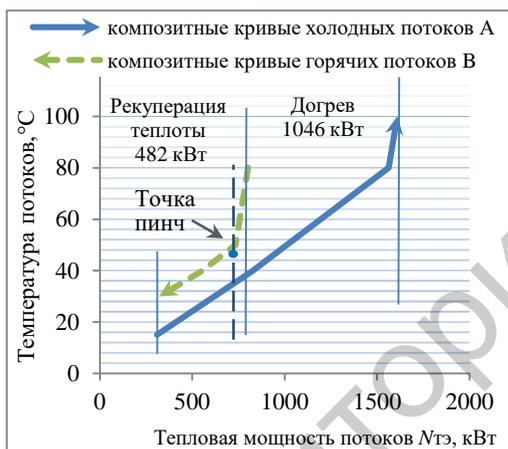


Рисунок 3. – Диаграмма трансформации потоков эксергии ЛНК в штатном режиме

Ситуация с эффективностью энергоиспользования АПД аналогична. Системы тепловой подготовки технологических потоков АПД характеризуются энергетическим КПД (32 %), эксергетическим КПД (26 %). Непосредственно для технологии АПД: эксергетический КПД – 0,17 %, затраты энергии – 11,5 ГДж/т материала, затраты эксергии – 3,3 ГДж/т. Объемы неиспользуемых

побочных потоков велики и достигают  $55 \text{ м}^3$  на тонну ткани, их средняя температура  $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$ . В качестве типового АПД для крашения х/б материалов взят джиггер с «модулем ванны»  $8 \text{ л/кг}$  [18].

Из анализа результатов следует необходимость экономически оправданных шагов по рациональному изменению структуры энергопотоков, рекуперации и утилизации энергии отходящих теплотехнологических побочных потоков предприятий отрасли. Для оценки потенциала рекуперации энергии указанных потоков проведен пинч-анализ. Непосредственное рекуперативное использование ТЭ на ЛНК приводит к уменьшению мощности потребления потока теплоты на  $0,5 \text{ МВт}$  в расчете на  $1 \text{ т/ч}$  х/б ткани (рисунок 4).



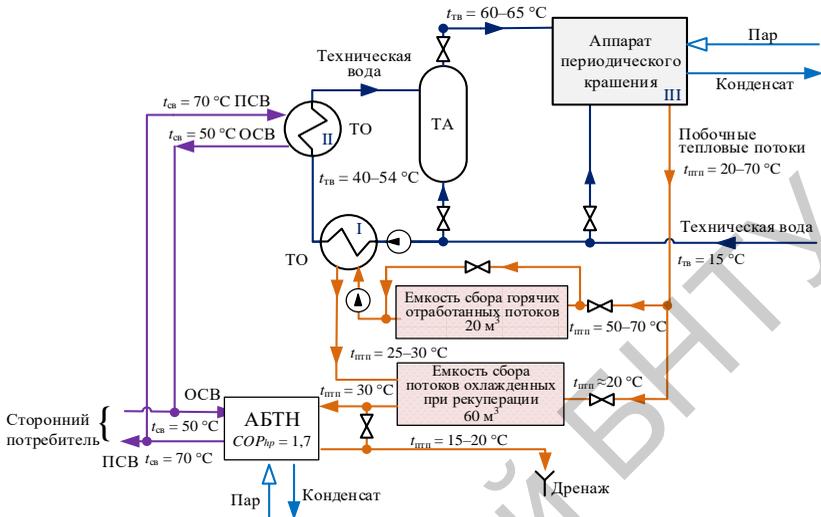
**Рисунок 4. – Комбинированные кривые потоков ЛНК производительностью  $1 \text{ т/ч}$**

Конструкция аппаратов и технология крашения позволяют использовать два теплоносителя – пар и воду – и с помощью последней предварительно нагревать ряд технологических потоков до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  при их конечном нагреве в аппарате от  $60$  до  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , осуществляемом паровым теплоносителем. С этой целью (для достижения выявленного граничного потенциала вклада водяного теплоносителя  $3,1 \text{ ГДж/т}$ , что позволяет перейти в том числе к рекуперации) отложено расширить состав оборудования теплотехнологической системы отделочного производства введением рекуперативных теплообменников и АБТН.

Верхняя граница рекуперации определена в  $20 \%$  ( $2,1 \text{ ГДж/т}$ ) от потребления ТЭ в штатном варианте при использовании простой передачи теплоты и АБТН. Для более полного использования энергии побочных потоков необходимо дальнейшее расширение энергосберегающей базы, предполагающее отпуск стороннему по отношению к линии потребителю избытков ТЭ, утилизируемых с помощью АБТН (рисунок 5).

Достигается снижение на  $18 \%$  мощности потребления ТЭ существующей линией, что требует перехода к совместному использованию парового и водяного теплоносителей. Открывается возможность подачи горячей технологической воды непосредственно на операции расщиповки, промывки, полоскания. Согласно итогам пинч-анализа рассматриваемой ЛНК, с горячей водой можно обеспечить подвод теплоты на указанные операции в количестве до  $3,1 \text{ ГДж/т}$  (т. е. не менее  $30 \%$  теплопотребления), снизив потребление пара до  $6,7 \text{ ГДж/т}$ .





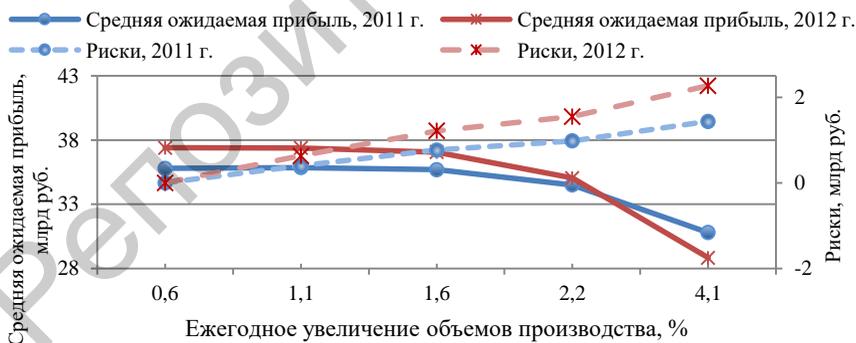
**ТА – тепловой аккумулятор; ТО – теплообменник; III – 3-я ступень нагрева технической воды; остальные обозначения приведены на рисунке 5**  
**Рисунок 6. – Принципиальная тепловая схема красильного аппарата периодического действия после интеграции АБТН в ее состав**

Результаты предлагаемых изменений в отношении системы тепловой подготовки технологических потоков: энергетический КПД вырос с 32 до 57 % при использовании рекуперации. Эксергетический КПД изменяется от 26 % соответственно до 50 %. В отношении эффективности технологического процесса АПД имеет место возрастание эксергетического КПД до 2,0 % против существующего 0,17 %, затраты энергии – 5,9 ГДж/т (снижение удельного энергопотребления на проведение теплотехнологических операций на АПД до 50 %), затраты эксергии – 1,7 ГДж/т материала, средняя температура сбрасываемых потоков 20 °С, отпуск теплоты внешнему по отношению к аппарату потребителю 2,9 ТДж/год. Обоснован и показан переход к многоступенчатому нагреву технологических потоков с предварительным подогревом водяным теплоносителем и интеграцией АБТН в состав системы энергообеспечения теплотехнологий. Внешнее использование ТЭ низкотемпературных побочных потоков перспективно в условиях хозяйственного комплекса Беларуси.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики прогнозирования потребления энергоресурсов текстильными и трикотажными предприятиями Беларуси на ближайшие 10–15 лет и выбора мощности их собственных когенерационных источников на основе статистических моделей динамики объемов выпуска продукции отрасли и типового предприятия. Для оценки ситуации и расчетов на перспективу с достаточной достоверностью привлечен комплекс методов прогнозирования с использованием статистических данных, постановлений и программ правительства [13].

Использован метод «проекции тренда», позволяющий получить прогнозы потребления продукции отраслью и типовым предприятием с помощью математических уравнений [13]. Достоинства метода заключаются в использовании минимального количества исходных данных при достижении высокой точности прогноза, относительно простой адаптации к конкретным прикладным задачам прогнозирования.

В результате расчетно-аналитических исследований получены модели прогноза объемов выпуска продукции текстильными и трикотажными предприятиями Беларуси до 2020 г. Анализ динамики прогноза выпуска продукции показал, что к 2020 г. прогнозируется его рост до 12 % по отношению к 2011 г. при ошибке прогноза до 1,5 % объема производства 2011 г. [13]. На основе полученных прогнозов для типового предприятия (ОАО «БПХО»), специализирующегося на производстве ж/б пряжи и тканей, проведены анализ вариантов наращивания объемов производства и определение наиболее безрискового роста потребления энергоресурсов [14]. В качестве стратегий приняты пять вариантов развития ситуаций. Суть методики статистической оценки рисков наращивания объемов производства и соответственно энергопотребления заключается в получении средней ожидаемой прибыли и соблюдении рисков при заданном увеличении объемов производства. Использован метод максимизации суммы математических ожиданий прибыли с учетом вероятности реализации сценария и среднего квадратичного отклонения как индекса риска, позволяющий выбрать оптимальное решение [1]. Результаты расчетов наращивания производства по выбранным стратегиям ежегодного увеличения объемов производства от 0,6 до 4,1 %, приведены на рисунке 7.



**Рисунок 7. – Средняя ожидаемая прибыль и риски при наращивании объемов производства для ОАО «БПХО» (по данным 2012–2013 гг.)**

Анализ результатов показал, что для ОАО «БПХО» наиболее выигрышным является годовой прирост производства до 1,1 %. Для наиболее безрискового увеличения объемов производства, предприятию рекомендовано не наращивать производство более чем на 5–10 % к 2020 г. по отношению к 2011 г.

При определении базовой мощности энергоисточника следует опираться на полученные результаты, а также принятые в теплоэнергетике типовые решения. Рост объемов производства и соответственно энергопотребления ОАО «БПХО» к 2030 г. определен в 21 %. В результате реализации мероприятий по использованию энергии побочных потоков с учетом коэффициента теплофикации и прогнозируемой динамики объемов производства базовая мощность теплогенерирующего источника для предприятия составляет 60–70 % существующей максимальной нагрузки, или порядка 4,8–5 МВт.

В пятой главе по результатам ТДА отделочного производства разработано научно-методическое обеспечение модернизации ТЭСТПП, на основе которого выполнена ее реструктуризация для типового предприятия [17, 19]. Научно обоснованы границы применения рекуперации и перераспределения мощностей энергетических потоков теплотехнологических процессов путем аккумулярования ТЭ побочных потоков.

На базе теории интенсивного энергосбережения:

1. Рассматриваются традиционные пути достижения поставленной цели в рамках действующих технологий: повышение энергетического КПД отдельных установок, рекуперация и утилизация ТЭ побочных технологических потоков (рисунок 8).

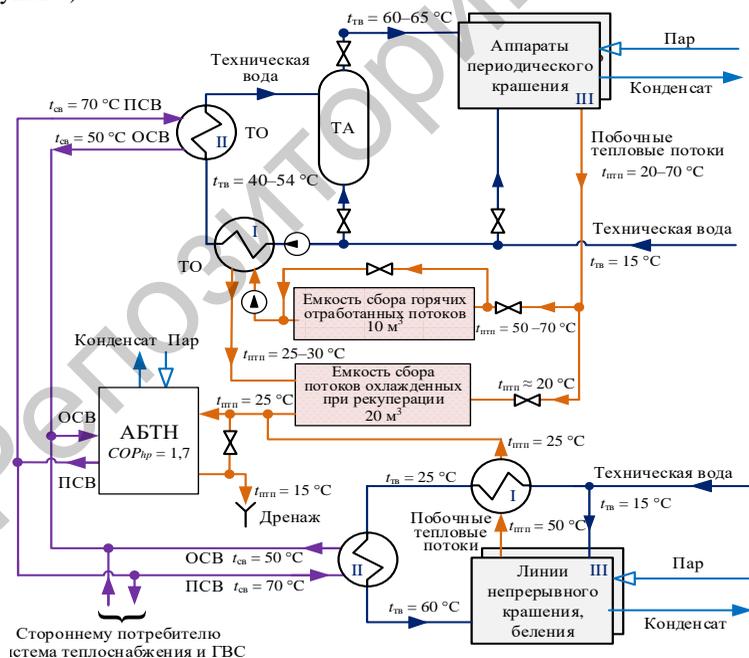


Рисунок 8. –Тепловая схема отделочного производства текстильного предприятия после модернизации

2. Для увеличения реализуемого энергосберегающего потенциала, наряду с традиционными путями улучшения энергоиспользования, необходим системный подход к решению задачи и расширение энергосберегающей базы. В качестве внешнего энергоиспользования для теплоэнергетической системы отделочного производства предлагается система теплоснабжения и горячего водоснабжения (ГВС) предприятия. В результате за счет АБТН обеспечивается рекуперация ТЭ в количестве 126 ГДж/сут. в I ступени и 106 ГДж/сут. во II ступени (рисунок 8). Внешним потребителям отпускается 20,5 ГДж/сут. Побочные потоки охлаждаются до температуры 15 °С, экономя 178 ГДж/сут. ТЭ, что составляет 17 % технологического теплопотребления предприятия, или 1,9 тыс. т у. т. в год (в удельных единицах – 0,3 т у. т. на тонну материала).

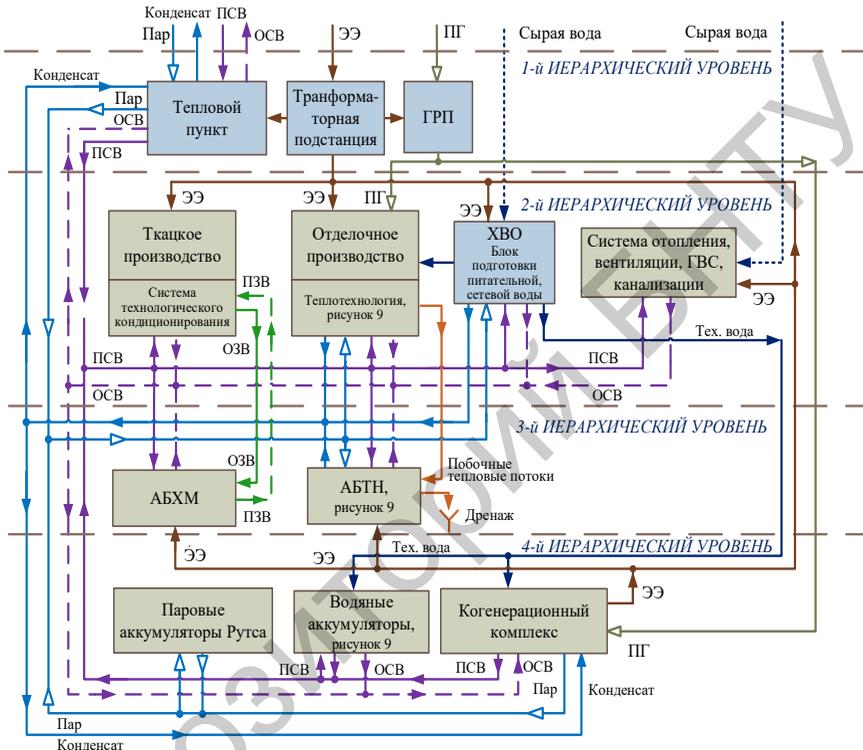
3. Дальнейшее повышение эффективности связано с модернизацией и рациональным построением теплоэнергетической системы предприятия, учитывающим иерархию подсистем. Наивысший приоритет при реструктуризации теплоэнергетической системы в сложившихся внешних для предприятия условиях имеют мероприятия по глубокой утилизации теплоты побочных потоков. Они снижают потребность в импортируемом первичном топливе для генерации теплоты, что актуально в условиях работы АЭС [19].

Использование теплоты потока рекуперированной горячей воды в технологии отделочного производства решает задачу снижения энергопотребления, но не обеспечивает полную утилизацию энергии побочных потоков.

Выход за границы отделочного производства обеспечивает развитие энергосберегающего эффекта. В этом случае решается проблема сезонности потребления ТЭ, характерная для систем теплоснабжения. Для ткацкого и прядильного производств требуется осуществлять технологическое кондиционирование с помощью абсорбционных холодильных машин, использующих сетевую воду с температурами 85 °С. Избытки ТЭ сетевой воды при глубокой утилизации теплоты сбросных технологических потоков диктуют выход за границы предприятия и кооперацию с внешними теплопотребителями, находящимися в близлежащей территориальной зоне [3].

Наряду с совершенствованием технологического теплоиспользования необходимо обеспечить эффективное энергообеспечение предприятия. В этом случае создаются условия для достижения как максимальных результатов энергосбережения, так и снижения энергетической составляющей себестоимости продукции. Последнее сопряжено с уменьшением расходов на электрообеспечение, которое связано с уменьшением электропотребления за счет введения в состав ТЭС/ТЭЦ собственного когенерационного энергоисточника. Выполнение последнего ограничения требует проведения полного энергобаланса предприятия, на базе которого определяются мощности когенерационного и пиковых источников. В часы ночных провалов нагрузок в энергосистеме когенерационный источник должен допускать беспрепятственные временные остановки, что накладывает жесткие условия на тепловые схемы сопряжения энергоисточника с ТЭС-

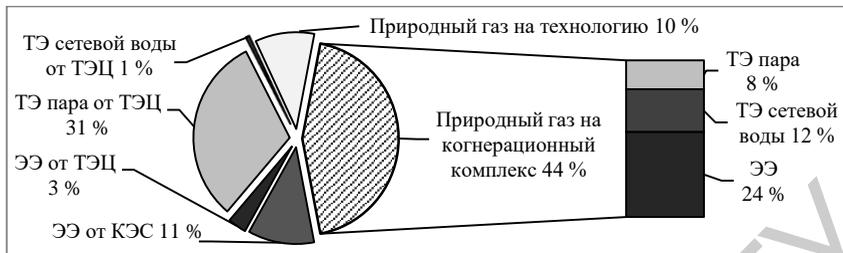
ТТП и выбор типа ДВС. Исходя из изложенного рассматривается решение задачи на примере ОАО «БПХО». Общий вид ТЭСТТП и ее иерархического построения приведен на рисунке 9.



**ОЗВ, ПЗВ – соответственно обратная и прямая захлаженная вода; АБХМ – абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина; ПГ – природный газ**  
**Рисунок 9. – Структурная схема теплоэнергетической системы ОАО «БПХО» и ее иерархических подсистем**

В результате реализации научно-методического обеспечения модернизации теплоэнергетических систем на базе методологии интенсивного энергосбережения для типового предприятия отрасли обеспечивается:

1) системная экономия топлива, которая составляет до 6,3 тыс. т у. т. в год, или до 1,1 т у. т. на тонну материала. Структура энергобаланса предприятия принимает вид, показанный на рисунке 10;



**Рисунок 10. – Структура приходной части энергобаланса ОАО «БПХО» после реструктуризации его теплоэнергетической системы**

2) снижение показателей удельного потребления энергии и эксергии на 20 %, или соответственно на 37 и 35 ГДж/т;

3) совокупный энергосберегающий потенциал, который с учетом прогнозов изменения объемов энергопотребления для текстильных и трикотажных предприятий Беларуси к 2020 г. оценивается в 0,09 млн т у. т. в год. Суммарные объемы стоков по текстильным и трикотажным предприятиям возрастут до 7,9 млн м<sup>3</sup>/год. Охлаждение их до 15 °С даст дополнительный безтопливный поток теплоты до 1 млн ГДж/год, что соответствует ежегодной экономии условного топлива до 0,035 млн т.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В ходе исследования состояния теплоэнергетических систем отечественных и зарубежных текстильных и трикотажных предприятий установлена их низкая энергоэффективность, *определен* потенциал энергосбережения для указанных предприятий Беларуси с учетом прогнозов изменения объемов энергопотребления к 2020 г. в объеме до 85 тыс. т у. т. (30 % от объема энергопотребления), в том числе 35 тыс. т у. т. в год за счет рекуперации и утилизации тепловой энергии побочных потоков, до 50 тыс. т у. т. в год в результате перехода к комбинированной выработке энергопотоков на тепловом потреблении предприятий [2, 3, 6, 13, 19–24, 28–34].

2. Изучены методологические подходы количественной оценки эффективности энергообеспечения теплотехнологий и теплоэнергетических систем промышленных предприятий, и *показано*, что наиболее объективным и достоверным из известных методов для решения задач энергосбережения является термодинамический анализ на основе эксергетического метода и пинч-анализа. В то же время обоснована необходимость его адаптации для анализа конкретных теплотехнологий, в том числе, для текстильных и трикотажных технологий в части расчета потоков эксергии окрашенных тканевых материалов [15–18].

3. Впервые разработана методика определения эксергии текстильных и трикотажных материалов, *включая* нахождение концентрационной, реакционной, термомеханической составляющих эксергии вещества в потоке, *учитывающая* влияние энергии связи кристаллизационной влаги с материалом и энергии адсорбции красителя текстильными материалами на составляющие эксергии вещества. Для наиболее распространенных текстильных и трикотажных материалов *установлена* структура эксергии, анализ которой *позволил* выявить значительные количественные различия ее составляющих, что *предопределило* выбор методики определения термодинамической эффективности теплотехнологии отделочного производства с использованием понятия «транзитная эксергия» [1, 12].

4. Методом термодинамического анализа исследована эффективность энергоиспользования технологическими аппаратами текстильных и трикотажных предприятий и получена ее количественная оценка: эксергетический КПД систем тепловой подготовки технологических потоков для линий непрерывного крашения – 18 %, для периодического действия – 26 % [15–18].

5. Научно *обоснован* предел рекуперации тепловой энергии побочных потоков в аппаратах крашения: 50 % теплопотребления в аппаратах периодического действия и 20 % в линиях непрерывного крашения. При использовании рекуперации теплоты для систем тепловой подготовки технологических потоков эксергетический КПД возрастает с 18 до 22 % для линий непрерывного крашения, и с 26 до 50 % для аппаратов периодического действия, что *приводит* к снижению их удельного энергопотребления соответственно на 20 и 50 % [8–11, 15–18, 29].

6. Разработана методика прогнозирования потребления энергоресурсов текстильными и трикотажными предприятиями на основе статистических моделей динамики объемов выпуска продукции отрасли и ее типового предприятия, *позволяющая* получить оценку потребности в энергоресурсах предприятием на ближайшую перспективу и на ее основе определять рациональную мощность собственного когенерационного источника с учетом ограничений, связанных с обеспечением надежности эксплуатации энергосистемы Беларуси [4, 5, 13, 14].

7. Разработано и внедрено научно-методическое обеспечение для структурных изменений теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий при их модернизации на основе совершенствования энергопотребления за счет рекуперации, сопряжения графиков потребления и генерации энергопотоков путем аккумулялирования энергии, многоступенчатости тепловой подготовки технологических потоков с расширением состава используемых теплоносителей, утилизации энергии побочных тепловых потоков с помощью абсорбционных тепловых насосов, а также совершенствования энергообеспечения за счет интеграции теплотехнологического и когенерационного оборудования. Показано, что такое построение теплоэнергетической системы на примере типового предприятия *обеспечивает* снижение удельного потребления энергоресурсов на тонну условной продукции на 20 % – с 182 до 145 ГДж, или 1,1 т у. т. [7, 17, 19, 25–27, 34].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты составили теоретическую основу для разработки практических рекомендаций при выполнении энергосберегающих проектов за счет комплексного совершенствования теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности, обеспечивающих экономию тепловой энергии до 50 % по отношению непосредственно к тепло-технологическим аппаратам и более 20 % топлива, требуемого для энергообеспечения указанных предприятий с соответствующим снижением выбросов парниковых газов в атмосферу.

Методы и результаты исследования были использованы при выполнении проектов модернизации теплоэнергетических систем текстильных предприятий ОАО «Гронитекс», ОАО «БПХО», ОАО «Купалинка» (акты внедрения), связаны с совершенствованием теплотребления путем перехода к многоступенчатой подготовке технологических потоков, расширением состава используемых теплоносителей, что позволило внедрить рекуперацию теплоты и обеспечить полное использование тепловой энергии когенерационных комплексов в первую очередь за счет теплотехнологических потребителей, чем осуществляется совершенствование энергообеспечения теплотехнологических предприятий.

Результаты исследования соискателя использования при разработке строительного проекта модернизации теплоэнергетической системы ОАО «БПХО», в рамках которого обоснованы и осуществлены схемы многоступенчатого подогрева технологических потоков с применением водяного и парового теплоносителей, позволяющие осуществить рекуперацию тепловой энергии и выравнивание графиков теплового потребления отделочного производства. Выбрана базовая мощность когенерационного источника 4,8 МВт с учетом прогнозной оценки потребления энергоресурсов, что обеспечило переход к энергообеспечению предприятия от собственного генерирующего источника без вытеснения Барановичской ТЭЦ, по-прежнему осуществляющей обеспечение отопительных нагрузок системы теплоснабжения предприятия. В результате это позволило снизить удельное энергопотребление на тонну продукции на 20 % и получить экономию природного газа более 3 тыс. т у. т. только за полугодовой период с момента ввода, что соответствует годовому экономическому эффекту 1,5 млн USD (акт внедрения).

Разработанные методики проведения термодинамического анализа на базе эксергетического метода используются в учебном процессе Белорусского национального технического университета на кафедре ПТЭиТ при выполнении дипломных проектов и чтении лекций по дисциплине «Теплоэнергетическая система промышленного предприятия» и при чтении лекций магистрантам по дисциплине «Энергоэффективные технологии в энергетике и промышленности». Также результаты используются в Техническом университете г. Дрезден (Гер-

мания) в проектах и НИР кафедры «Горение и теплообмен» при совершенствовании энергоиспользования отделочных производств соответствующих предприятий (акты внедрения).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1. Энергосбережение на предприятиях легкой промышленности / Б. М. Хрусталева, В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Перспективные материалы и технологии : в 2 т. / С. В. Авсейков [и др.] ; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2015. – Т. 2. – С. 293–312.

### Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

2. Романюк, В.Н. Потребление энергии и потенциал энергосбережения в промышленных теплотехнологиях и теплоэнергетике / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая, А.В. Романюк // Энергия и менеджмент. – 2011. – № 3. – С. 3–11.

3. Романюк, В.Н. Потребление энергии и потенциал энергосбережения предприятий легкой промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 1. – С. 52–60.

4. Романюк, В.Н. Эффективное обеспечение графика нагрузок энергосистемы / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А. В. Романюк, Н. А. Коломыцкая, А.А. Бобич // Энергия и менеджмент. – 2012. – № 1. – С. 11–18.

5. Романюк, В.Н. Регулирование генерации электроэнергии при повышении эффективности использования ТЭЦ / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая, А.В. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 2. – С. 67–77.

6. Романюк, В.Н. Потенциал комбинированной выработки энергопотоков на базе промышленных теплотехнологий Беларуси / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая, А.В. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 3. – С. 51–63.

7. Романюк, В.Н. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая, Т.В. Бубырь, С.В. Мальков // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 1. – С. 14–19.

8. Романюк, В.Н. Развитие энергосбережения на базе инновационной технологии абсорбционных тепловых насосов / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Д.Б. Муслина, Н.А. Коломыцкая, Т.В. Бубырь, С.В. Мальков // Энергоэффективность. – 2013. – № 2. – С. 28–30.

9. Романюк, В.Н. Пути повышения эффективности использования первичного топлива в Республике Беларусь / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич // Энергетическая стратегия. – 2013. – № 3. – С. 39–43.

10. Романюк, В.Н. Абсорбционные тепловые насосы в теплоэнергетических системах промышленных предприятий для снижения энергетических и финансовых затрат / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич // Энергия и менеджмент. – 2013. – № 2 (71). – С. 32–37.

11. Хрусталеv, Б.М. К вопросу развития энергообеспечения промышленных теплотехнологий и систем теплоснабжения в Беларуси / Б.М. Хрусталеv, В.Н. Романюк, В.А. Седнин, А.А. Бобич, Д.Б. Муслина, Т.В. БубырЬ // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 6. – С. 31–47.

12. Романюк, В.Н. Эксергия текстильных материалов / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 3. – С. 46–59.

13. Романюк, В.Н. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах (Часть 1) / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Наука и техника. – 2015. – № 4. – С. 66–76.

14. Романюк, В.Н. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах (Часть 2) / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 63–75.

15. Романюк, В.Н. К вопросу о повышении эффективности энергообеспечения линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 4–5 (85–86). – С. 4–13.

16. Романюк, В.Н. Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 6. – С. 41–54.

17. Романюк, В.Н. К вопросу совершенствования теплоэнергетической системы предприятий легкой промышленности на примере ОАО «Барановичское хлопчатобумажное объединение» / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергия и менеджмент. – 2015. – № 6 (87). – С. 17–26.

18. Романюк, В.Н. О совершенствовании энергообеспечения аппаратов периодического крашения на предприятиях легкой промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – № 1. – С. 25–45.

19. Романюк, В.Н. К вопросу рационального построения теплоэнергетической системы текстильных и трикотажных предприятий / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 151–167.

**Материалы докладов на конференциях, семинарах, тезисы докладов**

20. Муслина, Д.Б. Потребление энергии и потенциал энергосбережения предприятий легкой промышленности / Д.Б. Муслина, В.Н. Романюк, Т.В. Бубырь // Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности : материалы Междунар. науч. конф., Витебск, нояб. 2011 г. / Витебск. гос. техн. ун-т ; редкол. : В. В. Пятова (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2011. – С. 274–277.

21. Муслина, Д.Б. Инженерное обеспечение когенерационных комплексов / Д.Б. Муслина, А.А. Бобич // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Девятой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 янв. 2011 г. : в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Б.М. Хрусталева, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 84.

22. Романюк, В.Н. Комбинированное производство энергопотоков на предприятиях легкой промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Девятой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 янв. 2011 г. : в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Б.М. Хрусталева, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 86.

23. Романюк, В.Н. Комбинированное производство энергопотоков на предприятиях легкой промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина // Перспективы развития энергетики в XXI в. : материалы II Респ. науч.-практ. конф., Минск, 11–13 мая 2011 г. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол. : С. М. Силук [и др.]. – Минск, 2012. – С. 42.

24. Муслина, Д.Б. Потенциал энергосбережения предприятий легкой промышленности / Д.Б. Муслина // Проблемы теплоэнергетики : сб. науч. тр. / Саратовск. гос. ун-т ; редкол. : Ю.Е. Николаев [и др.]. – Саратов, 2012. – С. 186–194.

25. Muslina, D.B. Development of the heat power supply systems in textile industry / D. B. Muslina, T. V. Bubyr // Scientific and technical cooperation and technology transfer in the sphere of power efficiency and waste processing : Belarusian-German seminar, Minsk, 10–12 December 2012 / BNTU. – Minsk, 2012. – P. 32–34.

26. Муслина, Д.Б. Интенсивное энергосбережение в промышленной энергетике и теплотехнологиях / Д.Б. Муслина, Т.В. Бубырь, В.Н. Романюк // НИРС–2012 : сб. науч. работ студ. Респ. Беларусь / Изд. центр Беларус. гос. ун-т ; редкол. : А.Т. Жук [и др.]. – Минск, 2013. – С. 187–188.

27. Муслина, Д.Б. Когенерационный комплекс Барановичского производственного хлопчатобумажного объединения / Д.Б. Муслина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Одиннадцатой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 мая 2013 г. : в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Б.М. Хрусталева, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 82–83.

28. Муслина, Д.Б. Низкопотенциальные тепловые ВЭР предприятий концерна «Легпром» / Д.Б. Муслина, Т. В. Бубырь // Энергоэффективность и ресурсосбережение : материалы Беларус.-герм. семинара, Минск, 3–5 июня 2013 г. /

Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : А. С. Алексеенко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 106–108.

29. Муслина, Д.Б. Проблемы и задачи энергообеспечения легкой промышленности Беларуси и Германии / Д.Б. Муслина // Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения : сб. науч. тр. / Саратовск. гос. ун-т ; редкол. : Р.З. Аминов [и др.]. – Саратов, 2014. – С. 277–281.

30. Муслина, Д.Б. Энергосберегающий потенциал теплотехнологий легкой промышленности / Д.Б. Муслина // Новые горизонты 2014 : материалы Белорус.-кит. молодежного инновационного форума, Минск, 3–4 дек. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Ф.А. Романюк [и др.]. – Минск, 2014. – С. 99–100.

31. Муслина, Д.Б. Интенсивное энергосбережение в промышленной энергетике и теплотехнологиях / Д.Б. Муслина, Т. В. Бубырь ; науч. рук. В.Н. Романюк // Актуальные проблемы энергетике : материалы 69-й науч.-техн. конф. студ. и асп., Минск, 4–9 февр. 2014 г. [Электронный ресурс] – Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Ф.А. Романюк [и др.]. – Минск, 2014. – С. 176–177.

32. Муслина, Д.Б. Промышленная теплоэнергетика и ее место на предприятиях Германии / Д.Б. Муслина, В.Н. Романюк // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Двенадцатой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 мая 2014 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Б. М. Хрусталев, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2014. – Т. 1. – С. 97.

33. Муслина, Д.Б. Энергосберегающий потенциал теплотехнологий легкой промышленности / Д.Б. Муслина // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых с междунар. участием, Екатеринбург, 16–19 дек. 2014 г. : в 2 т. / Уральск. федер. ун-т им. перв. Президента России Б.Н. Ельцина; редкол. : Н И. Данилов. – Екатеринбург, 2015. – Т. 1. – С. 174–176.

34. Муслина, Д.Б. Интенсивное энергосбережение на отделочных производствах предприятий легкой промышленности / Д.Б. Муслина, В.Н. Романюк // Теплоэнергетика. Энергия-2015 : материалы Десятой Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Иваново, 21–23 апр. 2015 г. : в 7 т. / Ивановск. гос. энерг. ун-т ; редкол. : В.В. Тютиков [и др.]. – Иваново, 2015. – С. 158–160.

## РЭЗІЮМЭ

Мусліна Дар'я Барысаўна

**Навукова-метадычнае забеспячэнне мадэрнізацыі цеплаэнергетычных сістэм тэкстыльных і трыкатажных прадпрыемстваў лёгкай прамысловасці**

**Ключавыя словы:** цеплаэнергетычная сістэма, тэрмадынамічны аналіз, эксэргія тэкстыльных матэрыялаў, эксэргетычны метады, пінч-аналіз, цепла-тэхналогія, рэкуперацыя энэргіі пабочных цеплавых патокаў.

**Мэта работы** – распрацаваць навукова-метадычнае забеспячэнне мадэрнізацыі цеплаэнергетычных сістэм тэкстыльных і трыкатажных прадпрыемстваў лёгкай прамысловасці, якое дазваляе павысіць эфектыўнасць выкарыстання энэргарэсурсаў і вызначыць патэнцыял энэргазберажэння на названых прадпрыемствах.

**Метады даследавання:** ужываліся лікавыя метады і камп'ютарнае мадэляванне, сістэмны падыход на базе канцэпцыі інтэнсіўнага энэргазберажэння, у рамках якога праведзены: тэрмадынамічны аналіз тэхнічных сістэм на базе эксэргетычнага метаду, пінч-аналізу. Выкарыстаны статыстычныя метады аналізу і прагназавання аб'ёмаў вытворчасці прадукцыі і спажывання энэргарэсурсаў.

**Атрыманая вынікі і іх навізна.** Распрацавана метадыка разліку эксэргіі тэкстыльных і трыкатажных матэрыялаў. Атрымана колькасная адзнака тэрмадынамічнай эфектыўнасці энэргазабеспячэння ліній фарбавання, адзелачных вытворчасцяў, тэкстыльных і трыкатажных прадпрыемстваў лёгкай прамысловасці. Распрацавана метадалогія пабудовы рацыянальнай цеплаэнергетычнай сістэмы названых прадпрыемстваў, на аснове якой выканана рэструктурызацыя тыпавага прадпрыемства, якая забяспечвае ўдасканаленне яго энэргавыкарыстання і энэргазабеспячэння. У выніку на прыкладзе тыпавага тэкстыльнага прадпрыемства ўдзельнае энэргаспажыванне на тонну прадукцыі зніжаецца на 20 % – з 182 да 145 ГДж/т. Агульны энэргазберагальны патэнцыял галіны ацэньваецца велічынёй да 0,09 млн т у. т. у год.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі практычных рэкамендацый пры выкананні энэргазберагальных праектаў па ўдасканаленні цеплаэнергетычнай сістэмы тэкстыльных і трыкатажных прадпрыемстваў лёгкай прамысловасці, а таксама ў навучальным працэсе.

**Галіна ўжывання:** лёгкай прамысловасць.

## РЕЗЮМЕ

**Муслина Дарья Борисовна**

### **Научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности**

**Ключевые слова:** теплоэнергетическая система, термодинамический анализ, эксергия текстильных материалов, эксергетический метод, пинч-анализ, теплотехнология, рекуперация энергии побочных тепловых потоков.

**Цель работы** – разработать научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности, позволяющее повысить эффективность использования энергоресурсов и определить потенциал энергосбережения на указанных предприятиях.

**Методы исследования.** Применялись численные методы и компьютерное моделирование, системный подход на базе концепции интенсивного энергосбережения, в рамках которого проведены: термодинамический анализ технических систем на базе эксергетического метода, пинч-анализа. Используются статистические методы анализа и прогнозирования объемов потребления энергоресурсов.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана методика расчета составляющих эксергии текстильных материалов. Получена количественная оценка термодинамической эффективности энергоиспользования линий крашения, отделочных производств текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности. Разработана методология построения рациональной теплоэнергетической системы указанных предприятий, на основе которой выполнена реструктуризация типового предприятия, обеспечивающая совершенствование его энергоиспользования и энергообеспечения. В результате на примере типового текстильного предприятия удельное энергопотребление на тонну производимой продукции снижается на 20 % – с 182 до 145 ГДж/т. Общий энергосберегающий потенциал отрасли оценивается величиной до 0,09 млн т у. т. в год.

**Рекомендации по использованию.** Результаты исследования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций при выполнении энергосберегающих проектов по совершенствованию теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности, а также в учебном процессе.

**Область применения:** легкая промышленность.

## SUMMARY

Muslina Darya

### Scientific and methodological provision of heat energy supply system modernization of textile and knitwear enterprises

**Keywords:** heat energy supply system, thermodynamic analysis, exergy of textile materials, exergy method, pinch analysis, heat consuming technologies, wastes recycling.

**Objective:** to develop scientific and methodological framework of heat energy supply system modernization of textile enterprises based on the intensive energy conservation concept, what is necessary for radical increase of energy resources usage efficiency and for definition of energy-saving potential on mentioned factories.

**Research Methods.** Numerical methods and computer modeling, as well as system approach based on the intensive energy conservation concept were used. Thermodynamic analysis of technical systems based on exergy method and pinch analysis was also applied. Furthermore, statistical methods of analysis and forecasting of production volumes and energy consumption was used.

**Obtained results and their novelty.** A method for calculating exergy of textile and knitted materials was developed. Thermodynamic estimates of energy supply efficiency of dyeing machines, finishing department and whole textile and knitwear enterprises were obtained. The methodology of construction of a rational heat energy supply system of textile enterprises was developed. On this basis the restructuring of a typical textile enterprise was performed, the improvement of its energy use and energy supply was ensured. As a result, for typical textile enterprise (Ltd BPHO) the specific energy consumption per ton of company product is reduced by 20 % from 182 to 145 GJ/t. The total energy saving potential of the industry is 0.09 million. tce. per year.

**Recommendations for use.** The achieved results can be used to develop practical recommendations in carrying out energy-saving projects to improve the heating system of textile enterprises, as well as in the educational process.

**Application field:** textile industry.

Научное издание

**МУСЛИНА**  
**Дарья Борисовна**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ  
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕКСТИЛЬНЫХ  
И ТРИКОТАЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 18.04.2016.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 80. Заказ 367.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

## ЛИСТ ИЗМЕНЕНИЙ

к автореферату диссертационной работы

**Муслиной Дарьи Борисовны** «Научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Стр.8 – после формулы (1) читать:

где  $g_j$  – массовые доли компонентов материала на сухую массу;  $e_{r,j}$  – реакционная, удельная массовая эксергия  $j$ -го компонента, определяемая из справочной литературы, кДж/кг.

Для нахождения  $e_{r,j}$  горючих компонентов применяется методика Шаргутта с использованием высшей теплоты сгорания сухого вещества  $Q_B^c$ , кДж/кг, что находится в соответствии с законом Гесса о независимости теплоты реакций от пути перехода из одного состояния в другое, в данном случае – из исходного в состояние, соответствующее окончанию реакций девальвации веществ:

$$e_{r,j} = (Q_B^c + rW^c)\alpha, \quad (2)$$

где  $r$  – теплота парообразования воды при атмосферном давлении, кДж/кг;  $W^c$  – влажность рабочей массы горючего компонента, определенная на сухую массу, массовые доли;  $\alpha$  – корреляционная поправка для твердых углеводородов, зависящая от состава.

Ученый секретарь  
Совета по защите диссертаций  
кандидат химических наук, доцент



О. Ф. Краевская