

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 658.26:662.76:005.216.1

**ШЕНЕЦ**  
**Евгений Леонидович**

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЭР**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Минск, 2021

Научная работа выполнена в Гомельском государственном техническом университете имени П.О. Сухого

Научный руководитель

**ГРУНТОВИЧ Надежда Владимировна**,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Электроснабжение» учреждения  
образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»

Официальные  
оппоненты:

**РОМАНЮК Владимир Никанорович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение и  
вентиляция» Белорусского национального  
технического университета;

**ТИМОШУК Александр Леонидович**,  
кандидат технических наук, заведующий  
кафедрой «Теплоэнергетика и эффективное  
использование ТЭР» Государственного  
института повышения квалификации и  
переподготовки кадров в области  
газоснабжения «ГАЗ-ИНСТИТУТ»

Оппонирующая  
организация

Научно-исследовательское и проектное  
республиканское унитарное предприятие  
«БЕЛТЭИ»

Защита состоится 24 июня 2021 г. в 14.00 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, телефон ученого секретаря (017) 293-92-16, e-mail: pte@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 21 мая 2021 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук



А.А. Бобич

© Шенец Е.Л., 2021

© Белорусский национальный  
технический университет, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Республика Беларусь не имеет в необходимом объеме собственных топливно-энергетических ресурсов для обеспечения внутренних потребностей. Значительную долю в общем объеме потребляемых энергоресурсов занимают импортируемые топливно-энергетические ресурсы. В связи с этим приоритетом государственной политики в области эффективного использования ТЭР стало энергосбережение как фактор повышения экономической и энергетической безопасности государства.

На протяжении последних двух десятилетий практически во всех государственных программах, законах и постановлениях красной линией проходит необходимость корректировки действующих и разработки новых нормативно-технических документов в части повышения эффективности использования ТЭР. В обновленной Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь в качестве основных направлений развития топливно-энергетического комплекса, требующих научного сопровождения НАН Беларуси, отраслевых институтов, учреждений высшего образования и других организаций, выполняющих научные исследования и разработки, определены контроль, учет и интеллектуальное управление потреблением и производством ТЭР, а также энергоэффективное планирование развития городов, районов, отраслей и ставится задача активизации фундаментальных и прикладных научных исследований в области энергосбережения и высокоэффективных технологий.

Нельзя эффективно управлять потреблением ТЭР на всех уровнях (от производства до конечного потребления) без знания как общих закономерностей потребления, так и особенностей функционирования потребителей ТЭР.

В диссертационной работе представлены результаты исследований закономерностей формирования энергоэффективности (ЭЭФ) на примере предприятий по выпуску шин, производства листового стекла и ряда других промышленных потребителей. Результаты исследований позволяют производить оценку текущего состояния и прогнозировать ЭЭФ производств листового стекла с учетом как внутренних, так и внешних факторов, выявлять резервы повышения ЭЭФ и эффективные пути их достижения.

Исследования настоящей работы основаны на использовании методов статистического анализа энергопотребления промышленными предприятиями (ПП). Исследования энергоэффективности и потребления энергоресурсов для предприятий по выпуску листового стекла в настоящее время проводятся с использованием инструментальных методов оценки (тепловизионное обследование) отдельно либо в комплексе с расчетными методами, основанными на определении температурного баланса печей, которые являются весьма трудоемкими для определения энергоэффективного состояния печи.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнялась в соответствии с заданиями:

– Государственной программы научных исследований (ГПНИ) «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» 2010–2015 гг. задание 2.2.36 «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции» № Г.Р.20141922 от 20.08.2014 подпрограмма "Энергоэффективность". Этап 2014 г. «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции» и этап 2015 г. «Разработка методологических принципов формирования программ по энергосбережению для промышленных потребителей, работающих в условиях переменной технологической загрузки».

– ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии», 2016–2020 гг. Исследование проводилось на кафедре «Электроснабжение» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого по заданию № 1.2.25 «Разработка методического обеспечения для принятия решений при формировании режимов потребления газа для региональных систем газоснабжения» № Г.Р.20191676 от 11.07.2019 г. подпрограммы «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем».

### Цель и задачи исследования

Целью работы является установление закономерностей формирования показателей энергоэффективности и разработка методов их прогнозирования для промышленных потребителей со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией (на примере производства листового стекла).

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ научной литературы и обзор методов оценки показателей энергоэффективности промышленных потребителей, показать недостатки существующих методов, основанных на аналитических расчетах.

2. Сформировать информационную базу данных по суточным режимам потребления ТЭР и технологическим параметрам производства листового стекла за период 2004–2013 гг. с использованием положений регрессионного анализа и методов сглаживания временных рядов, построить математические модели потребления ТЭР.

3. Для предприятия по выпуску листового стекла разработать методики по оценке и прогнозированию показателей ЭЭФ, учитывающие сложную

взаимосвязь между энергетикой и технологией, а также фактор снижения ЭЭФ за счет износа огнеупоров стекловаренной печи.

4. Сформировать информационную базу данных по параметрам режимов потребления ТЭР для 116 промышленных производств, построить их математические модели потребления ТЭР, исследовать характер (структуру) энергопотребления.

5. Определить значимые факторы, учет которых позволяет достоверно прогнозировать энергопотребление и ЭЭФ промышленными производствами при внедрении энергосберегающих мероприятий.

6. Разработать метод распределения условно-постоянной составляющей расхода ТЭР для многономенклатурного предприятия.

**Объект исследования:** Промышленные потребители топливно-энергетических ресурсов, энергоэффективность промышленных потребителей в условиях изменения производственной программы, внедрения энергосберегающих мероприятий и старения технологических установок.

**Предмет исследования:** Режимы потребления топливно-энергетических ресурсов промышленными потребителями Республики Беларусь.

### **Научная новизна**

Научная новизна и значимость полученных результатов заключаются в следующем:

Разработана многофакторная аддитивная регрессионная модель суточного энергопотребления технологической линии по производству листового стекла в виде аддитивного регрессионного уравнения, включающая в качестве факторов: объем выпущенной продукции, содержание оксида железа в стекле, температуру наружного воздуха и количество суток эксплуатации печи.

Разработан метод оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла за счет износа огнеупоров стеклоплавильной печи, основанный на применении однофакторной модели топливopotребления от объема выпуска продукции и учете коэффициента регрессии фактора «количество суток эксплуатации печи» в условно-постоянной составляющей модели.

Впервые установлена зависимость между суточным потреблением топлива стеклоплавильной печью и ее производительностью, позволившая разработать способ оценки темпов снижения ЭЭФ печи по причине износа ее огнеупоров за весь эксплуатационный цикл работы и учитывающий все эксплуатационные кампании печи.

Выявлены факторы, определяющие степень достоверности прогнозирования энергопотребления промышленными производствами при внедрении энергосберегающих мероприятий, которые учитывают влияние производственной загрузки и характер внедряемого энергосберегающего мероприятия. Предложен способ оценки изменения и прогнозирования ЭЭФ при внедрении

энергосберегающих мероприятий, учитывающий характер внедряемого мероприятия и производственную динамику.

Разработан метод комплексной оценки регулировочной способности по ЭЭФ производства листового стекла, основанный на комбинированном использовании результатов моделирования суточных значений удельного расхода топлива от объема выпуска продукции и результатов кластерного анализа суточных значений удельных значений расхода топлива для соответствующей производительности линии по производству листового стекла.

Для промышленных предприятий с многономенклатурным производством разработан метод распределения условно-постоянной составляющей общезаводского расхода электрической энергии (ЭЭ) по видам продукции, основанный на применении коэффициента энергоемкости каждого вида продукции, полученный по статистической модели и позволяющий определять удельные расходы электропотребления для каждого вида продукции.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Многофакторная аддитивная регрессионная модель потребления топлива технологической линией по производству листового стекла, *позволяющая* оценить и спрогнозировать энергоэффективность стеклоплавильной печи и отличающаяся учетом суточных объемов потребляемого топлива (природный газ), объемов выпущенной продукции, температуры наружного воздуха, содержания оксида железа в стекле и количества суток эксплуатации печи.

2. Метод оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла за счет износа огнеупоров стеклоплавильной печи за весь эксплуатационный цикл, основанный и *отличающийся* применением однофакторной модели топливопотребления от объема выпуска продукции, учитывающей коэффициент регрессии фактора «количество суток эксплуатации печи» в условно-постоянной составляющей модели.

3. Упрощенный способ оценки темпов снижения энергоэффективности производства листового стекла, основанный на сравнении динамики удельного расхода газа, *отличающийся* использованием однофакторных моделей расхода топлива от суточного объема выпуска продукции линии по производству листового стекла.

4. Метод распределения условно-постоянной составляющей общезаводского расхода электрической энергии по видам производимой продукции для предприятия с многономенклатурным производством, основанный и *отличающийся* применением коэффициента энергоемкости каждого вида продукции, полученного по статистической модели, и *позволяющий* определять удельные расходы электропотребления для каждого вида продукции.

### **Личный вклад соискателя**

Представленные в диссертационной работе результаты исследований выполнены автором самостоятельно и в соавторстве с научным руководителем. Все изложенные методы, способы, положения, выводы, рекомендации разработаны автором лично. Постановка задачи, анализ и интерпретация полученных результатов осуществлены совместно с научным руководителем доктором технических наук, профессором Н.В. Грунтович.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на международных и республиканских конференциях, в числе которых:

1. XLIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», Московский авиационный институт, Москва, 5–19 апреля 2017 г.
2. Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность, энергетическая безопасность, конкурентоспособность», г. Витебск, февраль 2015 г.
3. Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики», ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Н. Новгород, декабрь 2015 г.
4. IV Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 10–12 июля 2017 г.
5. E3S Web of Conferences «High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED–2020)», Prague, Czech Republic, May 14–15 2020.
6. E3S Web of Conferences «Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES–2020)» 220, 01024 (2020), Saint–Petersburg, Russia, October 29–30, 2020.

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21 печатной работе, из них 6 статей в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 1 статья в тематическом журнале, 9 статей в сборниках международных и республиканских конференций, две из которых являются иностранным научным изданием, 5 тезисов докладов. Общее количество страниц опубликованных материалов составляет 83.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 168 страниц, количество рисунков – 40, таблиц – 28, приложение и список использованных источников из 120 наименований занимают 38 страниц.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Во введении** отражена проблема необходимости развития методического обеспечения в части комплексной оценки и прогнозирования показателей ЭЭФ для ПП со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией (на примере производства листового стекла), функционирующих в условиях частых изменений производственной программы, качества сырья, старения технологического оборудования, а также внедряемых мероприятий по энергосбережению.

**В первой главе** выполнен анализ показателей энергоэффективности промышленных предприятий. Для ПП Беларуси основными показателями ЭЭФ являются абсолютная величина потребления энергоресурсов и удельный расход энергоресурсов на единицу выпускаемой продукции, который формирует энергетическую составляющую затрат в структуре себестоимости продукции.

Проведен анализ существующих методов оценки эффективности внедряемых мероприятий по энергосбережению: экспериментальный метод; метод, основанный на результатах анализа результатов эффективности внедрения мероприятий схожих производств; метод, основанный на анализе данных фирм-производителей об эффективности предлагаемого оборудования; метод «срока окупаемости»; метод «нормы прибыли»; метод экономической оценки вариантов по критерию минимума приведенных затрат; метод экономической оценки вариантов с учетом фактора времени; математическое моделирование показателей ЭЭФ производства. Определены достоинства и недостатки существующих методов.

Описаны виды предприятий со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией, обозначена необходимость индивидуального подхода к определению их энергоэффективности в связи с наличием множества функционирующих подсистем предприятия при различных внутренних и внешних факторах, влияющих на ее энергоэффективность. Например, к таким факторам можно отнести сырьевые ресурсы и их изменяющиеся физико-химические характеристики, динамику производственной программы, тип выпускаемой продукции, сезонность, температуру окружающей среды, состояние технологического оборудования и т.д. Для прогнозирования ЭЭФ, адекватного определения суточного потребления энергоресурсов таких предприятий модель энергопотребления будет описываться аддитивной многофакторной регрессионной моделью.

В главе описаны проблемные зоны в функционировании государственного подхода по определению показателей ЭЭФ будущих периодов.

Изучение закономерности изменения и определения ЭЭФ ПП со сложной зависимостью между энергетикой и технологией представлено на примере предприятия по выпуску листового стекла ОАО «Гомельстекло», его линии, функционирующей в период 2004–2013 гг. Самым энергоемким потребителем является газовая стекловаренная печь с годовым потреблением топлива более 70000 т.т. в год. Для печей подобного типа в условно-постоянную составляющую энергопотребления входят следующие затраты: разогрев печи, поддержание печи в горячем состоянии, потери теплоты через футеровку печи, потери теплоты с энергией уходящих газов, потери теплоты через технологические отверстия. Действующие нормативные документы Республики Беларусь в области нормирования энергопотребления не учитывают данные технологические особенности работы печи. Обзор литературы по данному вопросу показывает, что современные специалисты выражают косвенно условно-постоянную составляющую расхода газа через полный тепловой баланс печи.

В главе представлен обзор-анализ научной литературы и существующих методов по определению состояния и ЭЭФ стекловаренных печей. Показана актуальность проблемы, а также недостатки существующих методов оценки и прогнозирования ЭЭФ.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена информационному и математическому обеспечению задач управления ЭЭФ ПП. Исследование функциональных связей между энергопотреблением и воздействующими факторами, проводимое в рамках диссертационной работы, основано на обработке информационной базы данных (ИБД) методами корреляционно-регрессионного анализа. Для поставленных в диссертационной работе задач использовались как регрессионные, так и временные модели. Итоговый вид модели определяется целями исследования, составом и объемом исходной информации.

Для решения поставленных задач рассмотрены и применены методы сокращения объема первичной информации: отбор показателей наиболее значимой группы факторов в соответствии с условиями решаемых задач; сжатие массивов ИБД за счет выбора значимых данных.

На рисунке 1 представлены основные направления использования методов корреляционно-регрессионного анализа для целей определения и прогнозирования ЭЭФ. Используемые в диссертационной работе методы регрессионного и кластерного анализа позволяют выполнить оценку ЭЭФ системы, сравнить работу подобъектов системы или ПП одной отрасли, выявить наиболее эффективные производства, обосновать норматив энергопотребления.



**Рисунок 1. – Основные направления использования методов статистического анализа при управлении энергетическими системами**

Для решения поставленных задач сформирована информационная база данных по суточным показателям режимов потребления ТЭР и технологическим факторам линии производства листового стекла (ЛПЛС) за 2004–2010 гг. (до проведения капитального/холодного ремонта печи) и 2011–2013 (после проведения капитального ремонта), построена аддитивная многофакторная математическая модель потребления природного газа ЛПЛС. Модель получена с использованием классического метода корреляционно-регрессионного анализа ИБД, значимые факторы определены по **коэффициенту Стьюдента (t-статистика)**.

Построение модели потребления природного газа при производстве листового стекла ОАО «Гомельстекло» проводилось в несколько этапов:

*Этап 1. Предварительный анализ данных.* Установлены основные цели моделирования, перечень статистической информации, логика информационной базы данных. Основные параметры, вошедшие в ИБД, приведены в таблице 1.

*Этап 2. Формирование базы данных.* Сформированная база данных по технологической линии производства листового стекла включает в себя ежесуточные значения за период 2004–2010 гг. (более 35 000 первичных значений и более 10 000 значений обработанной базы данных).

*Этап 3. Первичная обработка статистических данных,* включающая пересчет суточных значений потребленного природного газа в т.у.т., заполнение пустот в информационном поле, сглаживание данных в информационной выборке, статистическую оценку исследуемых факторов.

*Этап 4. Вычислительный анализ и построение модели регрессии:* определение связей между факторами с целью исключения коллинеарности входных параметров модели; оценка значимости факторов модели; анализ

качества коэффициентов регрессии и самой модели; проверка остатков на нормальность распределения.

В таблице 1 представлены результаты математического моделирования энергопотребления ЛПЛС. Впервые для учета влияния старения оборудования в модель энергопотребления при производстве листового стекла внесен такой параметр, как  $N$  – «количество суток эксплуатации печи», что позволило оценить скорость старения технологического оборудования ЛПЛС и связанное с этим увеличение объема потребляемого энергоресурса.

Таблица 1. – Результаты математического моделирования расхода газа на производство листового стекла

Параметр	Коэффициенты регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика
Производительность, т/сутки	107,89	4,39	24,56
Толщина стекла, мм	-183,49	348,05	-0,53
Плотность, т/м <sup>3</sup>	60604,74	46856,65	1,29
Температура наружного воздуха, °C	144,60	8,93	16,20
Содержание FeO в стекле, %	484515,87	63632,03	7,61
Содержание Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в стекле, %	9023,87	30705,05	0,29
Содержание Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в песке, %	36373,22	39363,25	0,92
Содержание Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в доломите, %	1489,77	684,49	2,18
Соотношение Ш/Б, %	-72967,42	115690,42	-0,63
	-124141,94	116301,14	-1,07
Влажность шихты, %	-3957,86	1658,32	-2,39
Количество суток эксплуатации печи	11,83	0,71	16,65

Из таблицы 1 видно, что наиболее значимыми являются суточная производительность линии, температура наружного воздуха, содержание FeO в стекле, количество суток эксплуатации печи.

Итоговая суточная аддитивная многофакторная модель расхода газа ЛПЛС, учитывающая только значимые факторы:

$$B = f(P, t_n, F, N) = 163,5 \cdot P + 157,7 \cdot t_n + 8,05 \cdot 10^5 \cdot F + 14,6 \cdot N, \text{ кг у.т., (1)}$$

где  $P$  – производительность, т;  $t_n$  – среднесуточная температура наружного воздуха, °C;  $F$  – содержание оксида железа в стекле, %;  $N$  – количество суток эксплуатации печи, сут.

Коэффициенты регрессии для каждого фактора определены методом наименьших квадратов, факторы, вошедшие в модель, проверены на мультиколлинеарность по коэффициенту парной корреляции Пирсона. Ошибка

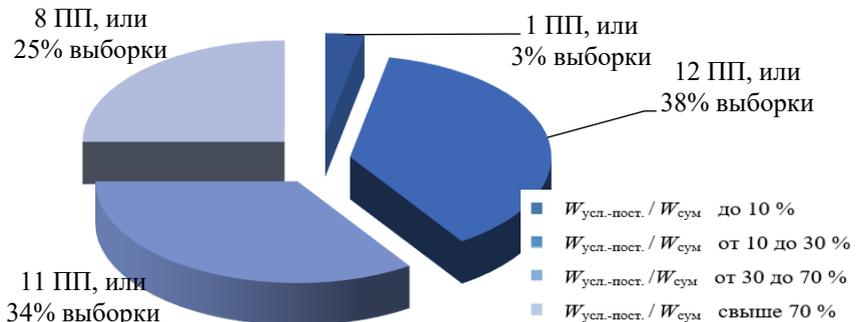
прогнозирования газопотребления проверена на фактических данных будущих периодов, погрешность модели не превысила порога в 2%.

Описание значения каждого статистически значимого фактора модели и механизм применения данных значений для целей оценки и прогнозирования энергоэффективности ЛПДС представлены в главе 4.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена исследованию влияния условно-постоянной составляющей потребления ТЭР на формирование результирующей ЭЭФ.

Наличие условно-постоянной составляющей в расходе энергоресурса определяет: регулировочную способность по ЭЭФ за счет изменения объема выпуска продукции; текущую ЭЭФ; эффективность внедряемых мероприятий по энергосбережению. Последнее особенно важно, так как неоспоримым является факт, что при внедрении эффективных технологий ожидаемый эффект значительно ниже прогнозных значений либо не достигается вообще.

Для проведения данного исследования сформирована и обработана информационная база данных суточных показателей режимов потребления 32 ПП, где основными применяемыми энергоресурсами являются тепловая энергия и природный газ, построены математические модели их энергопотребления. Выполнены исследования по определению веса условно-постоянной составляющей в общем расходе ТЭР для этих ПП. Определено, что из 32 производств 29 имеют высокую долю технологической условно-постоянной составляющей в общем расходе энергоресурса: от 20 до 98% (рисунок 2). В данную группу вошли предприятия по производству шин, метанола, этилового спирта, листового стекла, керамических изделий.

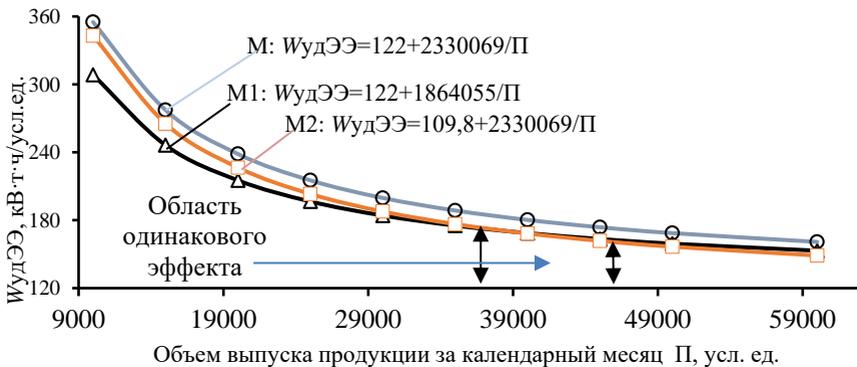


**Рисунок 2. – Распределение ПП по доле условно-постоянной составляющей в общем расходе ТЭР**

В главе также представлены результаты аналогичных исследований для 84 промышленных предприятий с основным энергоресурсом в производстве – электрическая энергия.

Исследование веса условно-постоянной составляющей по 116 промышленным предприятиям позволило установить: более половины исследуемых предприятий имеют долю условно-постоянной составляющей энергопотребления в общезаводском энергопотреблении свыше 50%. Условно-постоянная составляющей энергопотребления в общезаводском энергопотреблении не связана с объемом выпущенной продукции и имеет значительное влияние на энергопотребление и на энергоэффективность любого предприятия.

На примере шинного производства построены модели зависимости расхода ЭЭ от объема выпуска продукции (M), модели, учитывающие внедрение мероприятий, направленных на снижение технологической составляющей расхода ЭЭ (M2) и снижение условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ (M1) (рисунок 3).



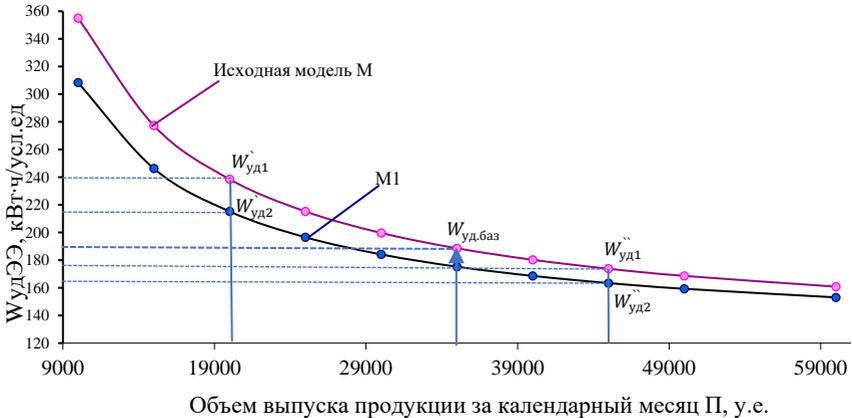
**Рисунок 3. – Модели общепроизводственного удельного расхода ЭЭ шинного производства**

Для повышения достоверности прогнозной оценки ЭЭФ обоснована необходимость учета трех факторов, таких как:

- структура потребляемого общезаводского расхода ТЭР;
- структура мероприятий по энергосбережению (мероприятия, направленные на снижение технологической составляющей расхода ТЭР, и мероприятия, направленные на снижение условно-постоянной составляющей);
- динамика производственной программы.

В случае снижения объема выпуска продукции эффект от мероприятий снижается за счет увеличения удельного расхода ЭЭ. Использование моделей до и после внедрения мероприятий позволяет оценить снижение ЭЭФ ( $W'_{уд2} > W_{уд,баз}$ , рисунок 4), оценить повышение ЭЭФ за счет внедрения мероприятий  $\Delta ЭЭФ = W'_{уд2} - W'_{уд1}$ .

При наращивании объема выпуска продукции эффект от мероприятия может быть значительно завышен, если оценивать его по инструментальным измерениям от базисного значения  $W_{уд.баз.}$ . Реальный эффект от мероприятия должен определяться по ниже представленному способу оценки изменения ЭЭФ при внедрении энергосберегающих мероприятий.



**Рисунок 4. – Пример изменения ЭЭФ при учете динамики производственной программы и внедрении мероприятия по энергосбережению**

Для исследуемого предприятия ошибка прогнозирования  $W_{уд}$  по существующей методике при неучете структуры мероприятий по энергосбережению и структуры потребления ЭЭ дает погрешность от +60,7% до -9,3% в зависимости от снижения либо повышения объема выпуска продукции.

Аналогичные результаты могут быть получены в случае внедрения мероприятий, воздействующих на технологическую составляющую расхода ЭЭ, с той только разницей, что данный эффект усиливается в области высокой загрузки оборудования и снижается в области низкой загрузки.

С учетом выполненных исследований по выявлению факторов, влияющих на результирующую энергоэффективность при внедрении энергосберегающих мероприятий предложен способ оценки изменения ЭЭФ, который описывается следующим алгоритмом:

1. На основе исходных статистических данных выполняется построение однофакторной регрессионной модели потребления ЭЭ вида:

$$W_{ЭЭ} = w_{уд.тех} \cdot \Pi + W_{усл.-пост}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

где  $W_{уд.тех}$  – технологический удельный расход ЭЭ, кВт·ч/ед.прод;

$W_{усл.-пост}$  – условно-постоянная составляющая потребления ЭЭ, не зависящая от объемов выпускаемой продукции, кВт·ч;  $\Pi$  – объем выпускаемой продукции, ед.прод.

Исходную модель приводим к модели удельного расхода ЭЭ:

$$W_{уд2}^{\ddot{}} = W_{уд.тех} + \frac{W_{усл.-пост}}{\Pi}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. прод.} \quad (3)$$

2. Определяется структура планируемых мероприятий по энергосбережению с выделением экономического эффекта (при базисном режиме) от мероприятий, направленных на снижение технологического расхода ЭЭ  $\Delta W_{уд.тех}$  или условно-постоянного  $\Delta W_{п}$ .

3. Определив структуру мероприятий по энергосбережению и исходную модель удельного расхода ЭЭ, проводим корректировку технологической составляющей удельного расхода ЭЭ и (или) условно-постоянной составляющей, рассчитываем удельный расход для соответствующей загрузки  $\Pi$ :

$$W_{уд1}^{\ddot{}} = (W_{уд.тех} - \Delta W_{уд.тех}) + \left( \frac{W_{усл.-пост.} - \Delta W_{п}}{\Pi} \right), \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. прод.}, \quad (4)$$

где  $\Delta W_{уд.тех}$  – мероприятие по энергосбережению технологического характера (снижение уд. расхода), кВт·ч/ед.прод;  $\Delta W_{п}$  – мероприятия по энергосбережению, воздействующие на условно-постоянный расход ЭЭ, кВт.

4. Сравнивая  $W_{уд1}^{\ddot{}}$  (после внедрения мероприятий) и  $W_{уд2}^{\ddot{}}$  (до внедрения мероприятий), соответствующие одному и тому же объему выпуска продукции, определяем реальный эффект от мероприятий, выраженный в значении снижения удельного расхода ЭЭ на единицу продукции:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = W_{уд2}^{\ddot{}} - W_{уд1}^{\ddot{}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. прод.} \quad (5)$$

В главе представлен метод распределения условно-постоянной составляющей модели потребления ЭЭ для ПП с несколькими производствами. Метод основан на расчете и применении коэффициентов энергоемкости каждого вида производства в соответствии с представленной на рисунке 5 последовательностью действий.

Наименование вычислительной операции, ед.изм.	Формула для вычисления
1.Сбор исходных данных	-
2.Построение математической модели расхода ЭЭ от влияющих факторов, кВт · ч	$W = W_{\Sigma \text{общ}} + \sum_{i=1}^{i=n} (\Pi_i \cdot W_{\text{уд.техн}i})$
3.Расчет средневзвешенного коэффициента регрессии (технологический расход ЭЭ), кВт · ч/ед. прод	$W_{\text{уд.техн}i}^{\text{ср.взв}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Pi_i \cdot W_{\text{уд.техн}i})}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} = \frac{W_{\text{техн}}^{\text{валовый}}}{\sum_{i=1}^n \Pi_i}$
4.Расчет коэффициента энергоемкости $i$ -го вида продукции	$k_{\text{Э}i} = \frac{W_{\text{уд.техн}i}}{W_{\text{уд.техн}i}^{\text{ср.взв}}}$
5.Распределение условно-постоянных расходов ЭЭ по $i$ -м видам продукции, кВт · ч	$W_{\text{общ}i} = \frac{k_{\text{Э}i} \cdot W_{\Sigma \text{общ}} \cdot \Pi_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i}$
6.Расчет удельного расхода ЭЭ с учетом доли энергоемкости и объема производства $i$ -го вида продукции, кВт · ч/ед. прод.	$W_{\text{уд}i} = W_{\text{уд.техн}i} + \frac{W_{\text{общ}i}}{\Pi_i}$

**Рисунок 5. – Последовательность действий применения метода распределения условно-постоянной составляющей модели**

**Четвертая глава** посвящена оценке и прогнозированию ЭЭФ предприятия по производству листового стекла (ТЭР – природный газ).

С учетом разработанной аддитивной многофакторной модели расхода газа ЛПЛС (1) установлено, что комплексная оценка состояния энергоэффективности ЛПЛС описывается коэффициентами регрессии статистически значимых факторов модели:

– на производство 1 т листового стекла ежемесячно используется 163,5 кг у.т.;

– изменение температуры окружающей среды на 1°C приводит к изменению суточного расхода газа на 157,7 кг у.т.;

– изменение содержания FeO в стекле на 1% приводит к изменению расхода газа на  $8,05 \cdot 10^5$  кг у.т.;

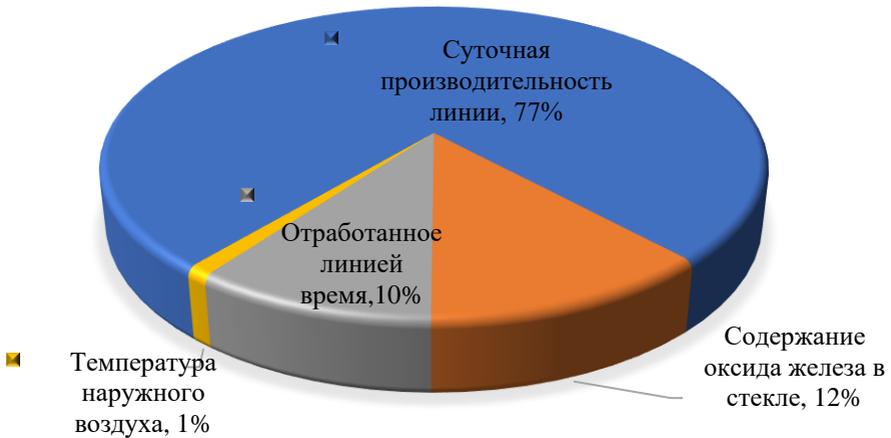
– коэффициент регрессии перед фактором «количество суток эксплуатации печи» обозначает, что ежесуточно расход газа увеличивается на 14,6 кг у.т.

Из таблицы 2 видно, что коэффициент регрессии при факторе «производительность» имеет тренд на увеличение, что говорит об износе огнеупоров печи и нарастающих теплопотерях через ограждающие конструкции. В тоже время наблюдается снижение данного коэффициента за счет проведенных горячих ремонтов в 2007 и 2008 годах. Так, за счет проведенных ремонтных работ на футеровке печи коэффициент регрессии показывает снижение расхода условного топлива на 5,87 кг на 1 тонну стекла при прочих равных условиях (коэффициент регрессии снизился с 166,1 до 160,23).

Таблица 2. – Динамика изменения коэффициентов регрессии математической модели потребления природного газа ЛПЛС

Период	Коэффициенты регрессии модели энергопотребления (К.Р.), стандартная ошибка (С.О.)							
	Кол-во суток эксплуатации печи «N»		Содержание FeO в стекле, %		Температура наружного воздуха, °C		Производительность, т/сутки	
	К.Р.	С.О.	К.Р.	С.О.	К.Р.	С.О.	К.Р.	С.О.
2004-2005	-5,4	1,44	$14,8 \cdot 10^5$	$8,6 \cdot 10^4$	95,94	23,46	146,92	3,4
2004-2006	6,98	0,7	$9,7 \cdot 10^5$	$6,6 \cdot 10^4$	135,8	16,37	161,49	2,7
2004-2007	13,4	0,5	$7,6 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^4$	127,14	13,5	166,1	2,5
2004-2008	14,3	0,4	$7,7 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^4$	169,53	12,46	164,5	2,4
2004-2009	15,2	0,23	$8,7 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^4$	172,37	10,53	160,23	1,8
2004–2010	14,6	0,2	$8,05 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	157,7	9,7	163,5	1,7

Визуальное представление влияния значимых факторов на общее газопотребление ЛПЛС по итогу шести лет эксплуатации представлено на рисунке б.



**Рисунок 6. – Доли влияния основных значимых факторов в формировании общего потребления объема газа ЛПЛС**

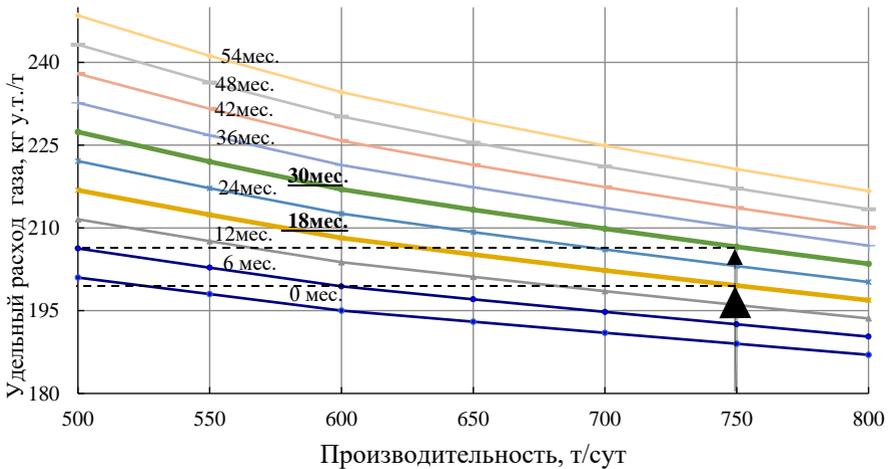
На основании модели (1) разработан метод оценки темпов снижения энергоэффективности линии по производству листового стекла за счет износа огнеупоров стеклоплавильной печи за весь эксплуатационный цикл, основанный и отличающийся применением однофакторной модели топливотребления от объема выпуска продукции, учитывающей коэффициент регрессии фактора «количество суток эксплуатации печи» в условно-постоянной составляющей модели, который предусматривает:

1) сбор и обработку данных по параметрам работы стекловаренной печи, формирование ИБД, в ИБД включается фактор «количество суток эксплуатации печи  $N$ », определяются статистически значимые факторы, формирующие потребление топлива печью. Построение аддитивной многофакторной модели топливотребления ЛПЛС без учета постоянного члена уравнения для выявления степени влияния каждого фактора. Методом наименьших квадратов выполняется расчет коэффициентов регрессии для каждого статистически значимого фактора;

2) построение однофакторной модели потребления топлива, преобразование модели потребления топлива в модель удельного расхода топлива вида:  $W_{уд.газ} = w_{уд.тех} + W_{усл.-пост} / П$ , кг у.т./т., где:  $w_{уд.тех}$  – технологический удельный расход топлива на производство 1 тонны стекла в сутки, кг у.т./т;  $W_{усл.-пост}$  – условно-постоянная составляющая топливотребления печью, которая не зависит от ее суточной производительности (поддержание печи в горячем состоянии, потери теплоты через ограждающие конструкции), кг у.т.;

3) учет коэффициента регрессии «количество суток эксплуатации печи  $N$ », определенный по аддитивной многофакторной модели, в качестве добавки к условно-постоянной составляющей  $W_{\text{усл.-пост}}$  однофакторной модели, умноженной на соответствующее прогнозируемое количество суток эксплуатации.

Графическая реализация метода и способ его практического применения представлен в виде номограммы (рисунок 7). Задаваясь плановой среднесуточной производительностью и отработавшей печью временем, определяются значения удельного расхода ТЭР будущих периодов эксплуатации. Погрешность метода проверена на прогнозировании потребления ТЭР ЛПЛС с использованием модели (1) и составила менее 2%.



**Рисунок 7. – Номограмма определения удельного расхода газа ЛПЛС по суточной производительности и отработанному печью времени**

Прогнозирование суточного объема расхода газа и оценка показателей ЭЭФ осуществляются на основе усредненных показателей  $t_n$  и  $F$ , ожидаемой загрузки ЛПЛС «Р» и номера суток эксплуатации печи «N» по модели (1).

В условиях относительно стабильных годовых значений характеристик исходного сырья и среднегодовой температуры оценить снижение ЭЭФ производства, вызванное износом огнеупоров, возможно с использованием однофакторной модели зависимости общего (удельного) расхода газа от объема выпущенной продукции (таблица 3). Предложен упрощенный способ оценки темпов снижения ЭЭФ ЛПЛС за счет износа огнеупоров печи, основанный на сравнении динамики удельного расхода газа (рисунок 8), определяемый по однофакторной модели топливопотребления от суточного объема выпуска

продукции. Снижение ЭЭФ ЛПЛС рассчитывается по результирующему изменению  $W_{уд,газ}$  (%) моделей каждого года эксплуатации при соответствующей загрузке ЛПЛС.

Таблица 3. – Модели удельных расходов газа ЛПЛС за 2005–2009 гг.

Год	Вид модели т у.т./т	$W_{уд,техн газ}$ , т у.т./т	Условно-постоянная сост-я расхода газа, т у.т.
2005	$W_{уд,газ} = 0,11 + 69,11/P_{сут}$	0,11	69,11
2006	$W_{уд,газ} = 0,07 + 101,8/P_{сут}$	0,07	101,83
2007	$W_{уд,газ} = 0,09 + 85,95/P_{сут}$	0,09	85,95
2008	$W_{уд,газ} = 0,04 + 130/P_{сут}$	0,04	130
2009	$W_{уд,газ} = 0,08 + 103,1/P_{сут}$	0,08	103,1

На рисунке 8 представлены модели  $W_{уд}$  в зависимости от суточной производительности за 2005–2009 гг.

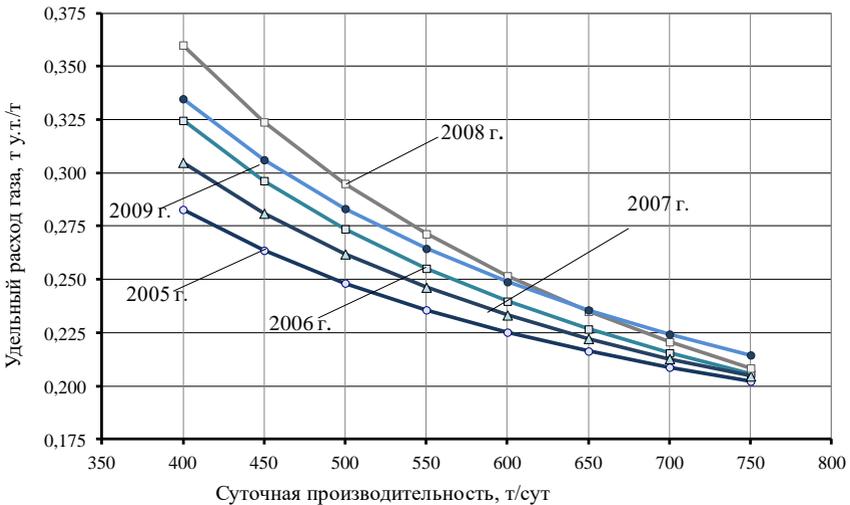
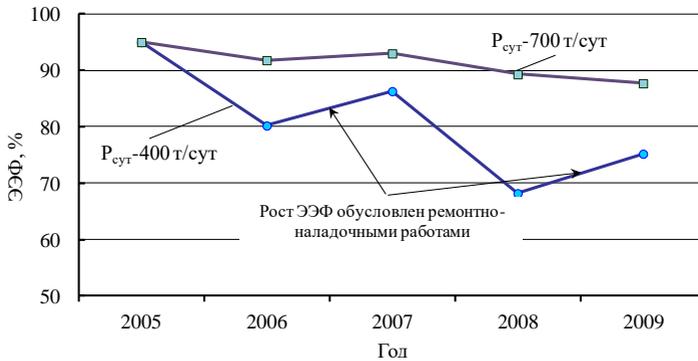


Рисунок 8. – Удельные расходы газа технологической линии производства листового стекла с 2005 по 2009 г.

На рисунке 9 представлена динамика изменения ЭЭФ производства листового стекла за 2004–2009 гг. при суточных нагрузках ЛПЛС 700 и 400 т/сут.



**Рисунок 9. – Динамика изменения ЭЭФ производства листового стекла за 2004–2009 гг. при суточной производительности 400 и 700 т/сут**

В соответствии с упрощенным способом установлено, что при низкой загрузке 400 т/сут ЛПЛС снижение ЭЭФ за счет износа огнеупоров печи проявляется в большей степени: за пятилетний период снижение ЭЭФ составляет 18,4%, или 4,6% в год. При производительности 700-750 т/сут (основная загрузка печи) результирующее изменение ЭЭФ составляет только 7,3% и 6% соответственно за пятилетний период, или 1,8% – 1,2% в год, и данный показатель коррелирует с выводами, изложенными в научных и обзорных работах английских и итальянских ученых и специалистов, представленных на 62-й и 75-й конференциях Conference on Glass Problem.

В диссертационной работе представлен метод комплексной оценки регулировочной способности по ЭЭФ ЛПЛС. Метод оценивает изменение ЭЭФ:

- за счет загрузки технологического оборудования (горизонтальное регулирование), где применяются результаты моделирования удельных расходов ТЭР (рисунок 10);

- за счет выбора и контроля технологических режимов (вертикальное регулирование), где используются результаты кластерного анализа (структурной группировки) суточных статистических значений удельных расходов ТЭР для соответствующей загрузки ЛПЛС (рисунок 11).

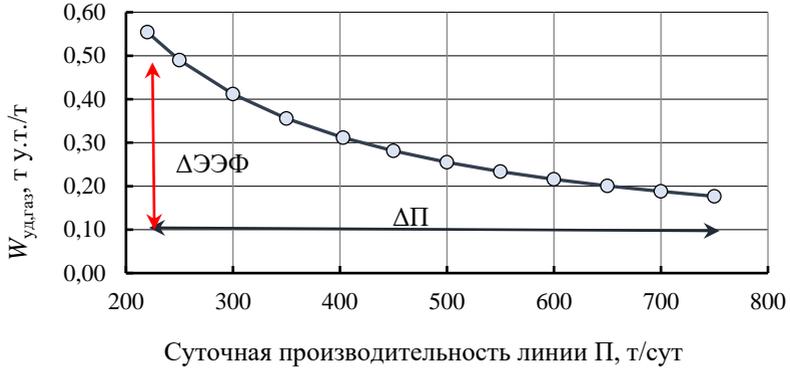
Метод заключается в расчете составляющих изменения ЭЭФ за счет изменения загрузки предприятия (формула 6) и изменения ЭЭФ за счет контроля технологических режимов предприятия по выпуску листового стекла (формула 7):

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (W_{\text{уд,Пб}} - W_{\text{уд,Пг}}) / W_{\text{уд,Пб}} \cdot 100, \% \quad (6)$$

где  $W_{\text{уд,Пб}}$  – удельный расход газа минимального по производительности режима, т у.т./т;  $W_{\text{уд,Пг}}$  – удельный расход газа любого по производительности режима, т у.т./т.

$$\Delta \text{ЭЭФ}_{Ki} = (W_{\text{уд., макс}, Ki} - W_{\text{уд., ср}, Ki}) / W_{\text{уд., ср}, Ki} \cdot 100, \% \quad (7)$$

где  $W_{\text{уд., макс}, Ki}$  – максимальное значение удельного расхода газа в классе  $K_i$ , т у.т./т;  
 $W_{\text{уд., ср}, Ki}$  – среднее значение удельного расхода газа в  $K_i$ -ом классе, т у.т./т



**Рисунок 10. – Общий вид однофакторной модели зависимости удельного расхода ТЭР от суточного объема выпуска продукции**



**Рисунок 11. – Кластерный анализ суточных значений  $W_{\text{уд.}}$  по соответствующим им нагрузкам ЛПЛС**

Максимальный потенциал снижения удельного расхода по горизонтальному регулированию составляет 69,4%, а по вертикальному регулированию в классе максимальной производительности с емкостью выборки 263 суток потенциал роста ЭЭФ оценивается в 812 т у.т.

Для ОАО «Гомельстекло» предложена методика нормирования ТЭР, основанная на разработанной модели удельного расхода газа от суточной производительности, что позволило рассчитать квартальные значения удельных расхода газа с погрешностью 0,3%.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе проведено изучение закономерностей формирования показателей ЭЭФ и разработаны методики их прогнозирования для промышленных предприятий со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией (на примере производства листового стекла), основанные на моделях зависимости потребления ТЭР от влияющих факторов.

### **Основные научные результаты диссертации**

1. В диссертационной работе показано, что использование аналитического подхода для прогнозирования показателей ЭЭФ ПП (на примере расчета прогрессивных норм расхода ТЭР) приводит к существенным расхождениям фактических и расчетных значений, поскольку не учитывается динамика производственной программы, которая может как усилить, так и снизить экономическую значимость мероприятий по энергосбережению, что искажает реальное состояние энергетической эффективности как отдельных потребителей, так и промышленного сектора в целом [1, 5]. Доказано, что моделирование режимов потребления ТЭР, основанное на математическом описании закономерностей формирования итогового потребления энергоресурса от влияющих факторов, является важнейшим элементом оценки ЭЭФ как производства в целом, так и мероприятий по энергосбережению, что, в конечном итоге, дает возможность оценить и выявить основные пути повышения ЭЭФ [2, 7, 8, 11, 14, 15].

2. На основе сформированной информационной базы данных предприятия по выпуску листового стекла разработана аддитивная многофакторная математическая модель суточного топливopotребления стеклоплавильной печи в виде регрессионного уравнения, включающая в качестве факторов: объем выпущенной продукции, содержание оксида железа в стекле, температуру наружного воздуха и впервые введенный фактор «количество суток эксплуатации печи». Ошибка прогнозирования объема потребления

природного газа по модели составила менее 2% от фактического значения за рассматриваемый период пяти месяцев эксплуатации [2, 4, 5, 6, 14, 15].

3. Впервые для производства листового стекла на основе модели расхода природного газа от влияющих факторов, таких как производительность технологической линии, температура наружного воздуха, содержание оксида железа в стекле и количество суток эксплуатации печи, разработан метод оценки снижения энергетической эффективности производства листового стекла за счет старения оборудования (износа ограждающих конструкций/огнеупоров), что позволило выявить ежесуточное увеличение расхода природного газа исследуемой печи в среднем на 14,6 кг у.т./сут по итогу 6 лет эксплуатации печи [2, 4, 5, 6, 15]. Доказано, что на энергопотребление производства листового стекла значительное влияние оказывает износ огнеупоров печи. Впервые для учета этого процесса в модель энергопотребления введен фактор «количество суток эксплуатации печи» [14], который позволяет определять снижение ЭЭФ за счет износа огнеупоров печи.

4. На основе однофакторной модели зависимости расхода газа от производительности печи разработан упрощенный метод оценки темпов износа огнеупоров. Метод основан на сравнении среднесуточных (на годовом интервале) значений удельных расходов газа на производство листового стекла при одинаковых объемах выпуска продукции. Метод позволяет оценить снижение ЭЭФ будущего периода эксплуатации с учетом фактического износа огнеупоров печи, проведенных ремонтных работ и внедренных на линии мероприятий по энергосбережению. Ежегодное ухудшение ЭЭФ печи за счет износа огнеупоров оценено в 1,2%. Экономический эффект от внедрения методики составил за август-сентябрь 2013 г. 136 316,6 USD [2, 4, 5, 6, 15].

5. Предложен метод комплексной оценки регулировочной способности по ЭЭФ технологических линий производства листового стекла, основанный на комбинированном использовании результатов моделирования удельных расходов ТЭР и результатов кластерного анализа суточных значений удельных расходов энергоресурса. Метод позволяет спрогнозировать изменение энергетической эффективности предприятия за счет изменения производственной программы и контроля технологических параметров ЛПЛС. Рассчитан эффект от внедрения методики, который оценен в 812 т у.т. за исследуемый период (263 суток) для базисной загрузки линии по производству листового стекла от 760 до 775 т/сут [9, 4, 5, 6, 16].

6. Впервые для 32 промышленных потребителей, использующих в технологическом процессе тепловую энергию и природный газ, выявлена технологическая условно-постоянная составляющая, которая не зависит от

объемов производства продукции предприятия и оказывает влияние в условиях изменения производственной программы на изменение общего и удельного расхода ТЭР [1, 5, 9, 16].

7. Для промышленных предприятий с многономенклатурным производством разработан метод распределения условно-постоянной составляющей общезаводского расхода электрической энергии (ЭЭ) по видам продукции, основанный на построении многофакторной математической модели электропотребления и учетом коэффициента энергоемкости каждого вида продукции [1, 5, 13].

8. На примере шинного производства доказано, что для повышения достоверности прогнозирования удельного и общего расхода ЭЭ необходимо учитывать три фактора: структуру потребляемого энергоресурса; структуру мероприятий по энергосбережению; динамику производственной программы. Предложен способ, отличающийся достоверной оценкой изменения и прогнозированием ЭЭФ при внедрении энергосберегающих мероприятий, учитывающий характер внедряемого мероприятия и производственную динамику [2, 5, 16, 18].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработана Методика нормирования расхода ТЭР технологическими линиями производства листового стекла в рамках НИОКР «Разработка методики нормирования расхода ТЭР для ОАО «Гомельстекло» на основе математических моделей зависимости расхода ТЭР от влияющих факторов» № ГР20081639 от 24.07.2008 г., которая позволяет нормировать удельные и прогнозировать общий расход ТЭР с погрешностью не более 2%. Методика утверждена заместителем генерального директора по менеджменту, науке и технологии ОАО «Гомельстекло» от 08.04.2010.

2. Разработана Методика оценки старения оборудования технологических линий производства листового стекла с использованием однофакторных моделей удельных расходов газа на выпуск продукции. Экономический эффект от внедрения методики оценен стоимостью потребленных ТЭР с применением повышающих коэффициентов к тарифам на ЭЭ и природный газ согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь от 30.12.2012 № 1261 и составил за август–сентябрь 2013 года 136 316,6 USD, методика утверждена главным инженером ОАО «Гомельстекло» от 16.12.2013.

3. С практической точки зрения разработанные методики помогают промышленным предприятиям:

- определять потенциал ЭЭФ предприятия при условии наращивания производительности и внедрении энергосберегающих мероприятий, планировать расходы ТЭР;

– определять технологическое состояние оборудования, определять либо корректировать нормативный срок его службы;

– проводить более детальное планирование объема потребления газа, планировать средства для расчета с газоснабжающей организацией, готовить обосновывающие документы по удельным расходам ТЭР.

4. Разработано методологическое обеспечение для принятия решений при формировании режимов потребления газа для региональных систем газоснабжения. Методологическое обеспечение утверждено первым заместителем генерального директора государственного производственного объединения по топливу и газификации «БЕЛТОПГАЗ».

5. Представленные в диссертации материалы внедрены в учебный процесс в виде лекций и практических занятий по курсу «Основы энергосбережения» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого и Института повышения квалификации кадров агробизнеса и международных связей «Брянский государственный аграрный университет». Внедренные результаты – лекционные и практические занятия по темам: методическое обеспечение и научные подходы при проведении энергетических обследований; показатели ЭЭФ и способы их оценки; оценка текущего состояния ЭЭФ и прогнозирование показателей ЭЭФ на основе расчетно-статистических моделей зависимости удельного расхода ТЭР от объема выпуска продукции.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

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

1. Шенец, Е.Л. Анализ показателей эффективности использования энергоресурсов и методов оценки эффективности внедрения мероприятий по энергосбережению на промышленных предприятиях / Е. Л. Шенец, А. А. Капанский // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 2. – С. 6–11.
2. Грунтович, Н.В., Шенец Е.Л. Влияние структуры потребления ТЭР предприятия на эффективность внедрения мероприятий по энергосбережению / Н.В. Грунтович, Е.Л. Шенец / Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014 – № 2. – С. 58–66.
3. Мороз, Д.Р. Моделирование потребления электроэнергии промышленными предприятиями с неоднозначной взаимосвязью между электропотреблением и отчетным выпуском продукции / Д. Р. Мороз, Е.Л. Шенец // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ– 2007. – № 6. – С. 20–31.
4. Грунтович, Н.В. Комплексная оценка эффективности мероприятий по энергосбережению с использованием однофакторных математических моделей удельного расхода ТЭР от объема выпуска продукции / Н. В. Грунтович, Е.Л. Шенец, С.В. Зиновьева // Энергоэффективность. – 2013. – № 11. – С. 35–39.
5. Грунтович, Н.В. Развитие методического обеспечения для диагностирования энергетической эффективности / Н.В. Грунтович, Д.Р. Мороз, С.Г. Жуковец, Е.Л. Шенец // Энергия и Менеджмент. – 2017 – № 1(94) – С. 8–13.
6. Грунтович, Н.В. Использование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Н.В. Грунтович, Д.Р. Мороз, А.А. Капанский, С.Г. Жуковец, Е.Л. Шенец // Энергия и Менеджмент. – 2017 – № 3(96). – С. 21–25.

### Статьи в иностранных тематических журналах и сборниках

7. Капанский, А.А. Особенности сбора и обработки данных для построения вероятностно–статистических моделей энергопотребления / А.А. Капанский, Е.Л. Шенец // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 1 (14). – С. 12–22.

### Материалы конференций

8. Грунтович, Н.В. Разработка методологической базы диагностирования и прогнозирования энергоэффективности промышленных производств / Н.В. Грунтович, Л.М. Маркарянц, Е.Л. Шенец // Энергоэффективность, энергетическая безопасность, конкурентоспособность: сборник материалов 12 Международной научно–практической конференции, Витебск,

19–20 марта 2015 г. / Витебский областной исполнительный комитет: ответственный за выпуск: Луковникова С.В. – Витебск – С. 43–49.

9. Грунтович, Н.В. Оценка горизонтальной регулировочной способности по энергоэффективности промышленных производств различных отраслей промышленности / Н.В. Грунтович, С.Г. Жуковец, С.А. Жеранов, Е.Л. Шенец // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, Нижний Новгород, 18.12.2015 г. / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева; редкол.: А.Б. Дарьенков (отв. ред.). – Нижний Новгород – С. 160–164.

10. Шенец, Е.Л. О необходимости совершенствования системы нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов потребителей / Е.Л. Шенец, П.М. Колесников. // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы VIII Международной межвузовской науч.-техн. конф., Гомель, 28–29 апреля 2008 г. / Гом. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; редкол.: Н.Б. Козловская (отв. ред.). – Гомель. – С. 433–436.

11. Грунтович, Н.В. Формирование результирующей эффективности схожих производств при внедрении одного и того же мероприятия по энергосбережению / Н.В. Грунтович, Е.Л. Шенец // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Тамбов, 10–12 июля 2017 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т; редкол.: Т.И. Чернышова (отв. ред.). – Тамбов, 2017. – С. 400–402.

12. Капанский, А.А. Основные направления использования методов статистического анализа при анализе энергоэффективности производства / А.А. Капанский, Е.Л. Шенец // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.–техн. конф., Тамбов, 10–12 июля 2017 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т ; редкол.: Т.И. Чернышова (отв. ред.). – Тамбов, 2017. – С. 110–111.

13. Шенец, Е.Л. Метод распределения условно-постоянной составляющей расхода электрической энергии при построении многофакторных математических моделей электропотребления / Е.Л. Шенец, А.А. Капанский // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции, посвящается 100-летию плана ГОЭЛРО. Нижний Новгород, 17–18 декабря 2020г.: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева; редкол.: А.Б. Дарьенков (отв. ред.). – Нижний Новгород, 2020. – С. 351–356.

14. Мороз, Д.Р. Способ оценки снижения энергоэффективности производства листового стекла / Д.Р. Мороз, Е.Л. Шенец // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.–техн. конф., Тамбов, 10–12 июля 2017 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т ; редкол.: Т. И. Чернышова (отв. ред.). – Тамбов, 2017. – С. 418–419.

15. Shenets, Y. Study of gas consumption patterns for sheet glass enterprises/ Yauhen Shenets, Deniz Moroz, Nadzeya Hruntovich, Mikhail Malashanka, A. Tsvetkov. E3S Web of Conferences 178, 01039 (2020). // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED–2020). / Prague, Czech Republic, May 14–15, 2020: A. Drozdov (Eds.). – P. 1–5.

16. Moroz, D Using models of energy consumption from influencing factors to assess the current state and energy efficiency forecasting/ Deniz Moroz, Nadzeya Hruntovich, Aliaksei Kapanski, Yauhen Shenets, M. Malashanka, E. Gracheva. E3S Web of Conferences 220, 01024 (2020). // Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES–2020). / Saint–Petersburg, Russia, October 29–30, 2020: A. Fedyukhin and S. Dixit (Eds.). – P. 1–6.

#### **Тезисы докладов**

17. Грунтович, Н.В. Оценка регулировочной способности по энергоэффективности промышленных потребителей различных отраслей промышленности Гомельской области с учетом существующего уровня производственной программы / Н.В. Грунтович, С.А. Жеранов, Е.Л. Шенец // Тезисы докладов Международной НТК «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», Гамбовский государственный технический университет, 23–25 апреля 2014 г. – С. 210–212.

18. Грунтович, Н.В. Изучение факторов, влияющих на энергоэффективность современных производств / Н.В. Грунтович, Е.Л. Шенец // Сборник материалов МНТК «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», 15–19 сентября 2014 г., г. Севастополь, Севастопольский национальный технический университет, с.58–67.

19. Шенец, Е.Л. Разработка алгоритма построения регрессионной модели электропотребления для потребителей, выпускающих однородную продукцию / Е.Л. Шенец, П.М. Колесников // Современные проблемы машиноведения (научные чтения, посвященные Павлу Осиповичу Сухому): тезисы докладов VII междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–24 октября 2008 г. / Гом. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; редкол.: В. М. Кенько [и др.]. – Гомель, 2008. – С. 147.

20. Капанский, А.А. Решение проблемы оптимального формирования массива данных при построении регрессионных моделей энергоэффективности сложных технических систем / А.А. Капанский, Е.Л. Шенец // Гагаринские чтения – 2017: тез. докл. XLIII Междунар. молодёж. науч. конф., Москва, 5–19 апреля 2017 г.: / Московский авиационный институт – Москва, 2017. – С. 59–60.

21. Мороз, Д.Р. Разработка способа определения потерь мощности в распределительной сети предприятия / Д.Р. Мороз, Е.Л. Шенец. Современные проблемы машиноведения (научные чтения, посвященные 115-летию Павла Осиповича Сухого): тезисы докладов VIII междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–29 октября 2008 г. / Гом. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; редкол.: Г.П. Тариков [и др.]. – Гомель, 2010. – С. 153–154.

## РЭЗІЮМЭ Шэнец Яўген Леанідавіч

### Ацэнка і прагназаванне паказчыкаў энергаэфектыўнасці прамысловых спажываючых на аснове статыстычных мадэляў спажывання ПЭР

Ключавыя словы: энергаэфектыўнасць, прамысловыя спажываючыя, мадэляванне энергаспажывання, сувязь «энергетыка–тэхналогія», сістэмныя ўласцівасці і сувязі, шкляная вытворчасць, ацэнка зносу вогнеўпораў печы.

Мэта работы – вывучэнне заканамернасцей фарміравання паказчыкаў ЭЭФ і распрацоўка метадаў іх прагназавання для прамысловых прадпрыемстваў са складанай узаемасувязцю паміж энергетыкай і тэхналогіяй (на прыкладзе вытворчасці ліставага шкла).

Метады даследавання: метадалагічнай асновай даследаванняў з’яўляюцца палажэнні сістэмнага аналізу. Для інфармацыйнага апісання доследных ПС выкарыстоўвалася інфармацыйная база дадзеных. Функцыянальнае апісанне сістэмы энергазабеспячэння прамысловых прадпрыемстваў грунтавалася на палажэннях рэгрэсійнага аналізу, метадах згладжвання часовых шэрагаў, метадах кластэрнага аналізу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Прапанаваны спосаб ацэнкі і прагназавання энергетычнай эфектыўнасці для прамысловых спажываючых з простай узаемасувязцю паміж энергетыкай і тэхналогіяй пры ўліку структуры мерапрыемстваў па энергазберажэнні і дынамікі вытворчай праграмы. Для прадпрыемстваў па выпуску ліставага шкла, якія маюць складаную сувязь паміж энергетыкай і тэхналогіяй, распрацаваны метады ацэнкі ўплыву зносу вогнеўпораў печы на спажыванне газу, распрацаваны метады комплекснай ацэнкі энергаэфектыўнасці вытворчасці ліставага шкла, які дазваляе ўзбуйнена ацаніць як бягучы стан энергаэфектыўнасці, так і патэнцыял яе павышэння ва ўмовах нарошчвання аб’ёму выпуску прадукцыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі навуковай працы могуць быць выкарыстаны энергетычнымі службамі прамысловых прадпрыемстваў, дзяржаўнымі ўстановамі, якія выконваюць кантроль і зацвярджэнне ўдзельных расходаў ПЭР, узгадненне ўкараняемых энергазберагальных мерапрыемстваў з абгрунтаваннем эфекту, тэхнолагамі і энергетыкамі прадпрыемстваў, якія эксплуатаюць прамысловыя газавыя печы бесперапыннага дзеяння.

Вобласць прымянення. Агульныя заканамернасці, мадэлі і метадыкі, распрацаваныя ў дысертацыйнай рабоце, могуць прымяняцца для ацэнкі і прагназавання паказчыкаў энергаэфектыўнасці прадпрыемствамі розных галін прамысловасці, у прыватнасці, прадпрыемствамі па выпуску ліставага шкла.

## РЕЗЮМЕ

Шенец Евгений Леонидович

### Оценка и прогнозирование показателей энергоэффективности промышленных потребителей на основе статистических моделей потребления ТЭР

**Ключевые слова:** энергоэффективность, промышленные потребители, моделирование энергопотребления, связь «энергетика-технология», системные свойства и связи, стекольное производство, оценка износа огнеупоров печей.

**Цель работы** – изучение закономерностей формирования показателей ЭЭФ и разработка методов их прогнозирования для промышленных потребителей со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией (на примере производства листового стекла).

**Методы исследования:** методологической основой исследований являются положения системного анализа. Для информационного описания исследуемых промышленных предприятий использовалась информационная база данных. Функциональное описание системы энергоснабжения промышленных предприятий основывалось на положениях регрессионного анализа, методах сглаживания временных рядов, методе кластерного анализа.

**Полученные результаты и их новизна.** Предложен способ оценки и прогнозирования энергетической эффективности для промышленных потребителей с простой взаимосвязью между энергетикой и технологией при учете структуры мероприятий по энергосбережению и динамики производственной программы. Для предприятий по выпуску листового стекла, имеющих сложную связь между энергетикой и технологией, разработан метод оценки влияния износа огнеупоров печи на потребление газа, разработан метод комплексной оценки энергоэффективности производства листового стекла, позволяющий укрупненно оценить как текущее состояние энергоэффективности, так и потенциал ее повышения в условиях наращивания объема выпуска продукции.

**Рекомендации по использованию.** Результаты научной работы могут быть использованы энергетическими службами промышленных предприятий, государственными учреждениями, выполняющими контроль и утверждение удельных расходов ТЭР, согласование внедряемых энергосберегающих мероприятий с обоснованием эффекта, технологами и энергетиками предприятий, эксплуатирующими промышленные газовые печи непрерывного действия.

**Область применения.** Общие закономерности, модели и методики, разработанные в диссертационной работе, могут применяться для оценки и прогнозирования показателей энергоэффективности предприятиями различных отраслей промышленности, в частности, предприятиями по выпуску листового стекла.

## SUMMARY

Shenets Yauhen

### **Assessment and forecasting of energy efficiency indicators of industrial consumers based on statistical models of fuel and energy resources consumption**

**Keywords:** Key words: energy efficiency, industrial consumers, modeling of energy consumption, energy-technology connection, system properties and connections, glass production, assessment of the wear of furnace refractories.

**Objective:** studying the patterns of formation of energy efficiency indicators and developing methods for predicting them for industrial consumers with a complex relationship between energy and technology (for example, the production of sheet glass).

**Research methods:** the methodological basis of research is the provisions of systems analysis. For an informational description of the studied Industrial Enterprises, an information database was used. The functional description of the power supply system of Industrial Enterprises was based on the provisions of regression analysis, methods of smoothing time series, the method of cluster analysis.

**The results and their novelty:** A method for assessing and predicting energy efficiency for industrial consumers with a simple relationship between energy and technology, taking into account the structure of energy saving measures and the dynamics of the production program, is proposed. For enterprises producing flat glass, which have a complex relationship between energy and technology, a method has been developed to assess the effect of wear of furnace refractories on gas consumption, a method for a comprehensive assessment of the energy efficiency of flat glass production has been developed, which makes it possible to enlarge conditions for increasing the volume of production.

**Recommendations for use:** The results of scientific work can be used by the energy services of industrial enterprises, state institutions that control and approve the unit costs of fuel and energy resources, coordinate the implemented energy-saving measures with the justification of the effect, technologists and power engineers of enterprises operating industrial gas furnaces of continuous operation. energy consumption and assessing the current state of the energy efficiency.

**Applications:** The general laws, models and techniques developed in the dissertation work can be used to assess and predict energy efficiency indicators by enterprises of various industries, in particular, by enterprises producing flat glass.

Научное издание

**ШЕНЕЦ**  
**Евгений Леонидович**

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЭР**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Подписано в печать 04.05.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,45. Тираж 100. Заказ 256.