

ферменные стержневые структуры. Варианты агрегатов с подобной топологией легко сконструировать, исследовать их эффективность и корректировать метод в части частоты и сечения поддерживающих структур.

Возможно, что применение всех этих методов и анализ их эффективности позволят занять каждому методу свою нишу в конструкции планера самолета. В любом случае конструкторская мысль будет меняться и приспосабливаться к новым технологиям и возможностям. Вместе с этим будут рождаться и другие методы конструирования, позволяющие достигать более эффективных технических решений.

УДК 622.91:621.311

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Н. В. Грунтович

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Представлен обзор проводимых исследований в области диагностирования текущего состояния и прогнозирования показателей энергетической эффективности энергетических систем и промышленных комплексов. Для крупных промышленных потребителей предложено решение вопросов их устойчивого функционирования при объективной оценке энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции, управления их энергоэффективностью. Результаты анализа особенностей работы систем газоснабжения отдельных регионов и Республики Беларусь в целом позволили сформировать балансовую структуру потребления газа и учесть дальнейшее ее изменение при развитии системы газоснабжения в условиях устойчивого развития промышленного комплекса страны и вводе в эксплуатацию атомной энергетической станции.

Ключевые слова: энергоэффективность, удельные расходы энергоресурсов, моделирование, прогнозирование, режимы промышленных потребителей, системный анализ, региональные системы газоснабжения, сложная техническая система, печное оборудование, футеровка, водопроводно-канализационное хозяйство, искусственное волокно, транспортировка нефти.

ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT OF ENERGY SYSTEMS AND INDUSTRIAL COMPLEXES

N. V. Hruntovich

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The presented work is devoted to a review of ongoing research in the field of diagnosing the current state and predicting the energy efficiency indicators of energy systems and industrial complexes. For large industrial consumers, it is proposed to solve the issues of their sustainable functioning with an objective assessment of the energy component of costs in the structure of the cost of production, management of their energy efficiency. The results of the analysis of the features of the operation of gas supply systems in individual regions and the Republic of Belarus as a whole made it possible to form a balance structure of gas consumption and take into account its further change in the development of the gas supply system in the conditions of sustainable development of the country's industrial complex and the commissioning of a nuclear power plant.

Keywords: energy efficiency, specific energy expenses, modeling, forecasting, industrial consumers, system analysis, regional gas supply systems, complex technical system, stove equipment, lining, water supply, artificial fiber, oil transportation.

В Республике Беларусь, в одной из первых республик бывшего Союза, сложилась система государственного управления и контроля за эффективным расходованием топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) благодаря Л. А. Дубовику – первому Председателю Государственного Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь. Ключевыми моментами этой системы являются обязательное энергетическое обследование предприятий, учреждений, организаций, нормирование ТЭР, оценка целевого показателя по энергосбережению (ЦП). Для контроля за энергоэффективностью (ЭЭФ) предусмотрены формы Государственной статистической отчетности, данные которых позволяют оценивать текущее состояние ЭЭФ всех субъектов хозяйствования республики.

Так, в качестве первоочередных мер по реализации пятилетних Республиканских программ «Энергосбережение» ставились задачи по корректировке действующих и разработке новых нормативно-технических документов в части повышения эффективности использования ТЭР. Поэтому разработка новых методов, позволяющих выявлять и оценивать экономию электрической энергии (ЭЭ) от мероприятий в технологических процессах производственных предприятий (ПП), прогнозировать и нормировать как общие, так и удельные расходы ЭЭ (УРЭ) с учетом изменения объемов производственной программы, оценивать и нормировать ЦП в сопоставимых условиях, приобрела актуальность.

Целая плеяда таких известных ученых, как А. А. Федоров, А. В. Праховник, В. И. Гордеев, Б. В. Папков, Г. В. Никифоров, Б. И. Кудрин, С. И. Гамазин, И. Е. Васильев, А. Б. Лоскутов, Г. С. Хронусов, В. И. Доброжанов, В. Г. Журавлев, А. В. Ляхомский, Е. А. Конюхова, Е. М. Червонный и др., внесла свой вклад в развитие методов управления электропотреблением ПП.

Первые статистические модели потребления ЭЭ пришли к нам из 40-х гг. прошлого столетия, когда начали активно формироваться промышленные предприятия. Вид модели, описывающий закон изменения потребленной ЭЭ и выпущенной продукции:

$$W_{\text{уд.ЭЭ}} = w_{\text{уд.техн}} + W_{\text{усл.-пост}} / \Pi, \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. продукции},$$

где $W_{\text{усл.-пост}}$ – составляющая потребления энергоресурса, не зависящая от объема выпускаемой продукции, кВт · ч; $w_{\text{уд.техн}}$ – технологический удельный расход энергоресурса на выпуск единицы продукции, кВт · ч/ед. измерения; Π – объем производства продукции, ед. измерения.

Необходимость поиска новых подходов для решения задач оценки ЭЭФ, в первую очередь, определяется коренными изменениями условий функционирования промышленными предприятиями: это нестабильность производственной программы и увеличение энергетической составляющей затрат в структуре себестоимости продукции, что отразилось на ее конкурентной способности, а также сложность объектов управления (современное промышленное предприятие определено доктором технических наук, профессором Б. И. Кудриным в 80-х гг. как сложная техническая система кибернетического типа, состоящая из большого количества слабосвязанных и слабовазаимодействующих элементов). Для предприятий Беларуси появилась необходимость в условиях проводимой реконструкции и модернизации технологического оборудования выполнения производственной программы.

Впервые в 2004–2007 гг. для решения задач комплексной оценки ЭЭФ предприятий транспорта нефти (ПТН) со сложной взаимосвязью между электропотреблением и технологией предложено использовать многофакторные регрессионные модели электропотребления. Количество факторов, включенных в модель, изменяется в зависимости от решаемой задачи ЭЭФ и от состояния подсистем, определяющих технологическую систему в целом (рис. 1). Разработанная методология оценки ЭЭФ ПТН на основе регрессионной модели зависимости электропотребления от влияющих факторов позволяет определять экономию ЭЭ в технологическом процессе ПТН, автоматизировать расчет и повысить достоверность текущей и прогнозной оценок показателей энергетической эффективности, что подтверждается семью актами внедрения с суммарным экономическим эффектом 449 654 долл. США/год. Было показано, что подходы к оценке показателей ЭЭФ, разработанные для ПТН, могут быть адаптированы для ПП с простой (или сводящейся к ней) взаимосвязью между энергетикой и технологией. Для таких ПП использовалась однофакторная математическая модель расхода ЭЭ в зависимости от объемов произведенной продукции, которая позволяет:

- выполнять анализ существующих режимов производства и оценивать их энергоэффективность;
- производить расчет плановой потребности ТЭР в условиях изменяющейся производственной программы;
- оценивать потенциал энергоэффективности за счет повышения загрузки технологического оборудования и наращивания объемов выпуска продукции;
- производить оценку эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий;
- рассчитывать ЦП в сопоставимых условиях.

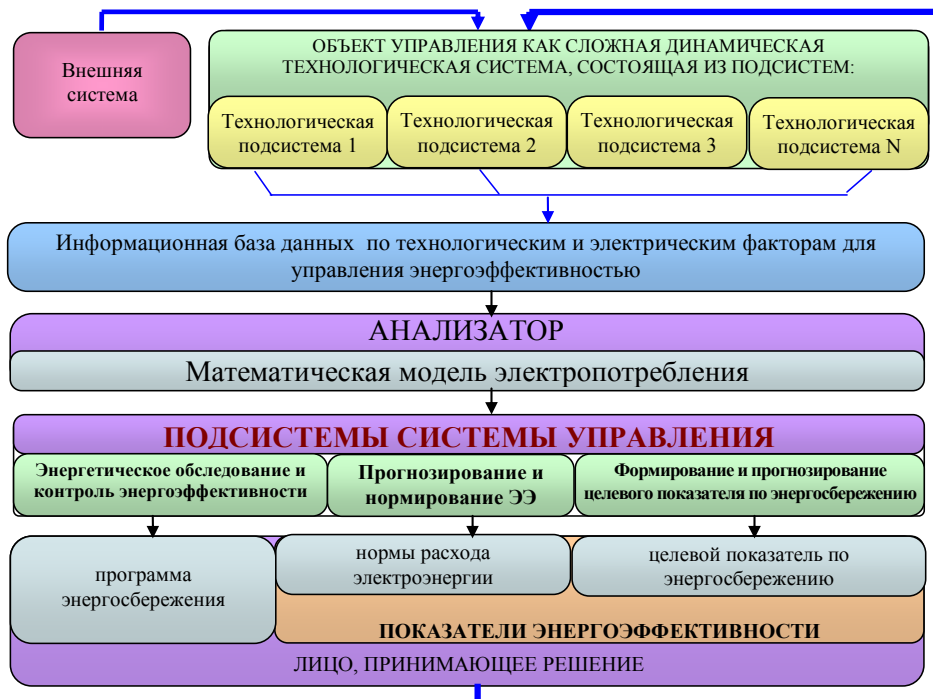


Рис. 1. Структурная схема управления энергоэффективностью промышленных предприятий

В 2010 г. на базе двух предприятий транспорта нефти «Дружба» была защищена диссертационная работа А. С. Фикова, в которой представлены методы определения потенциала энергосбережения от воздействия на эквивалентный диаметр нефтепровода и вязкость нефти, экспресс-оценки потенциала энергосбережения в технологии транспорта нефти, разработаны способы и программное обеспечение прогноза изменения электропотребления от реализации таких технологических энергосберегающих мероприятий, как очистка нефтешлама линейной части нефтепровода, применение противотурбулентной присадки, строительство лупингов для технологически незавершенных участках нефтепровода, работающих в условиях изменяющейся производственной программы.

В 2009 г. Д. Р. Мороз подготовил диссертационную работу «Моделирование энергопотребления промышленных потребителей для прогнозирования показателей энергетической эффективности» на базе Светлогорского ПО «Химволокно».

Впервые введено и определено понятие промышленного потребителя с неоднозначной взаимосвязью между энергопотреблением и отчетным объемом выпускаемой продукции как потребителя, технологический процесс которого включает в себя большое количество операций, растянутых во времени таким образом, что отчетный суточный объем выпускаемой продукции формируется в течение нескольких дней.

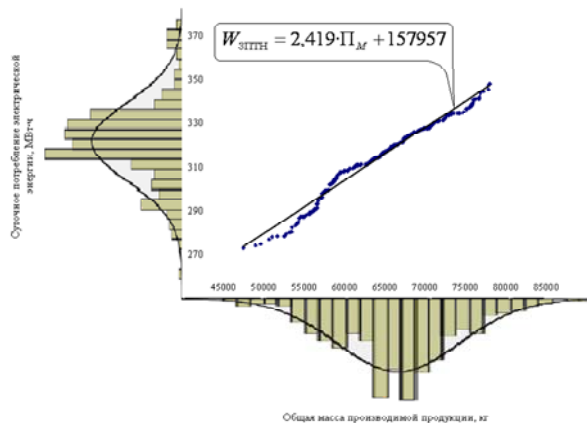


Рис. 2. Построение модели электропотребления с использованием параметров законов распределения объемов выпускаемой продукции и расхода электрической энергии

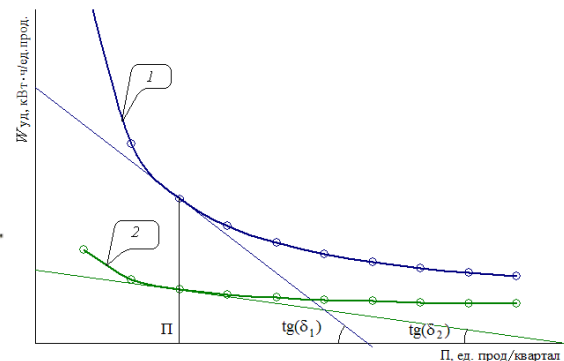


Рис. 3. Изменение угла наклона касательной к кривой $W_{уд} = f(\Pi)$ при изменении условно-постоянной составляющей электропотребления

Разработан способ построения модели энергопотребления промышленных потребителей с неоднозначной взаимосвязью между расходом ТЭР и объемами выпускаемой продукции, отличающийся сопоставлением параметров законов распределения электропотребления и воздействующих факторов и позволяющий повысить достоверность определения удельного технологического расхода ТЭР на выпуск продукции и условно-постоянной составляющей энергопотребления предприятия (рис. 2 и 3).

Впервые для такого крупного ПП на основе модели электропотребления разработаны:

- способ прогнозирования удельных расходов ТЭР промышленных потребителей с простой взаимосвязью между энергетикой и технологией и экономии энергетических ресурсов при изменении объемов выпускаемой продукции, отличающийся учетом изменения доли условно-постоянной составляющей расхода ТЭР в общем балансе предприятия;

– способ определения приоритетности внедрения энергосберегающих мероприятий, отличающийся учетом изменения эффекта от энергосберегающего мероприятия в условиях изменения объемов и номенклатуры выпускаемой продукции;

– способ определения ЭЭФ загрузки технологического оборудования ПП, основанный на использовании параметров модели энергопотребления и позволяющий выявить зоны энергетической эффективности и соответствующие им приоритетные направления энергосбережения.

Подготовленная докторская диссертация и кандидатские диссертации А. С. Фикова и Д. Р. Мороза положили начало формированию в Республике Беларусь научной школы по энергоэффективности [7].

В 2013 г. ОАО «Гомельстекло» инициировало научно-исследовательскую работу на тему «Прогнозирование показателей энергоэффективности, оценка потенциала энергосбережения и повышения энергоэффективности ОАО «Гомельстекло»». Основанием для проведения данной работы на ОАО «Гомельстекло» являлась невозможность выполнения директивных заданий по экономии ТЭР (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2012 г. № 1261 «О некоторых вопросах потребления электрической энергии и природного газа в 2013 году»), несмотря на ввод в эксплуатацию новой технологической линии производства листового стекла (запущена в эксплуатацию 25.03.2010 г.) и модернизацию старой технологической линии (введена в эксплуатацию 13.07.2004 г., остановлена на холодный ремонт 16.06.2010 г., запущена в эксплуатацию после реконструкции в феврале 2013 г.). Полученные результаты позволили предприятию обосновать невозможность выполнения задания по снижению расхода ТЭР в годовом объеме 5 % и освободить от значительных штрафных санкций. Результаты работы докладывались Вице-премьеру Республики Беларусь П. И. Семашко и получили поддержку в реализации научной работы. Многолетний мировой опыт эксплуатации печного оборудования (стекольные, цементные заводы) показал, что в процессе его эксплуатации происходит старение футеровки печи, вследствие чего тратится больше газа для компенсации потерь и поддержания параметров режимов плавки. В процессе исследований произведена оценка динамики старения футеровки печи технологических линий производства листового стекла.

Доказано, что за счет старения футеровки печи и износа ограждающих конструкций ежедневно расход природного газа на производство стекла увеличивался на 14,5 кг у. т. Это означало, что ежегодное снижение энергоэффективности производства листового стекла составляло в максимуме до 10 %. Фактическое снижение ЭЭФ за 5-летний период эксплуатации печи технологической линии производства листового стекла Л₁ составило 18,4 % относительно 2005 г., т. е. в среднем 4,6 % в год. Была произведена оценка энергоэффективности производства листового стекла после ввода в эксплуатацию современной технологической линии производства Германии Л₂ и модернизации старой технологической линии Л₁ [1, 2].

В 2010 г. после ввода в эксплуатацию новой технологической линии Л₂ снижение удельных расходов суммарных энергозатрат (газ и электроэнергия) на производство листового стекла составило 29 % для производительности 450 т/сутки. Достигнутое значение удельного расхода суммарных энергозатрат на уровне 0,24 т у. т./т соответствует лучшим мировым производствам листового стекла. Эффективность ремонтных работ линии Л₁ по суммарным энергозатратам в максимуме составила 15 % (при сравнении одинаковых по производительности режимов 2010 и 2013 гг.), а с учетом наращивания объема суточной производительности результирующая энергоэффективность производства листового стекла составила 26 %.

Научным результатом работы явилась 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 (рис. 4 и 5). Полученные научные результаты и составили основу диссертационной работы Е. Л. Шенца «Многофакторная модель и методы оценки и прогнозирования энергоэффективности промышленных потребителей на примере стекловарочного производства».

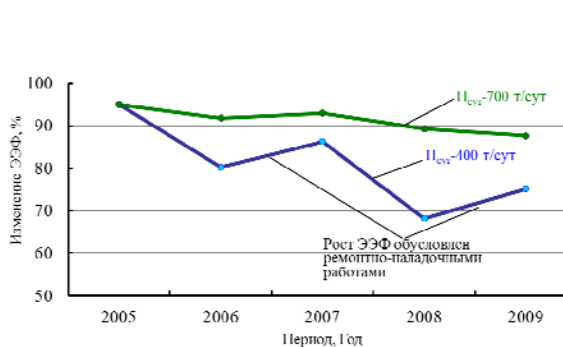


Рис. 4. Динамика изменения энергоэффективности производства листового стекла за 2004–2009 гг. при суточной производительности 400 и 700 т/сут

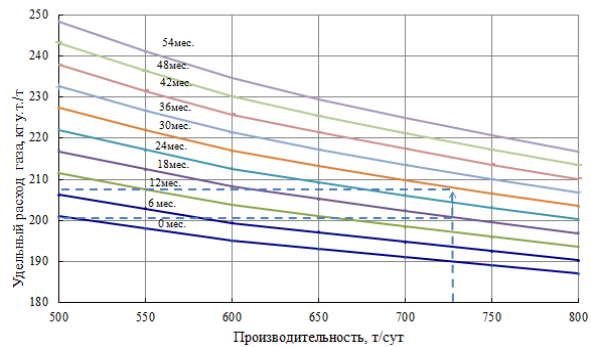


Рис. 5. Номограмма для определения удельного энергопотребления технологической линии при различных значениях воздействующих факторов на полугодовом интервале

С 2014 по 2016 г. А. А. Капанским проведена огромная научно-исследовательская работа для трех водоканалов Республики Беларусь: КПУП «Гомельводоканал», УП «Витебскводоканал», КЖУП «Уником», г. Жлобин. Им подготовлена кандидатская диссертация на тему «Прогнозирование и оценка текущего состояния энергетической эффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения». Работа выполнялась в соответствии с Государственной программой научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» по заданию 2.2.36 «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции». Исследования проводились на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого в рамках задания 2014 г. «Разработка методологических принципов формирования программ по энергосбережению для промышленных потребителей, работающих в условиях переменной технологической загрузки» и задания 2015 г. «Разработка методики прогнозирования показателей энергоэффективности промышленных предприятий, работающих в условиях переменной технологической загрузки при учете структуры потребляемых ТЭР и структуры внедряемых мероприятий по энергосбережению».

В диссертационной работе для предприятий водопроводно-канализационного хозяйства разработаны [3–5]:

– методы прогнозирования общих и удельных расходов ЭЭ, основанные на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, отличающиеся от

существующих методов корректировкой коэффициентов регрессии, направленной на минимизацию погрешности прогнозирования, позволяющие учесть внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод в эксплуатацию трубопроводных сетей, насосного оборудования, изменение качества очистки и объемов производства;

– способ оценки текущего состояния ЭЭФ, основанный на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, отличающийся определением коэффициента чувствительности изменения удельного расхода ЭЭ, позволяющий определить приоритетные энергосберегающие мероприятия;

– метод оценки регулировочной способности по ЭЭФ насосного оборудования, основанный на проведении инструментальных измерений режимов работы насосных агрегатов (НА), отличающийся определением фактических удельных расходов ЭЭ на подъем воды при сохранении конфигурации трубопроводной сети, позволяющий выявить резервы экономии ЭЭ при управлении режимами работы НА для заданных объемов водопотребления.

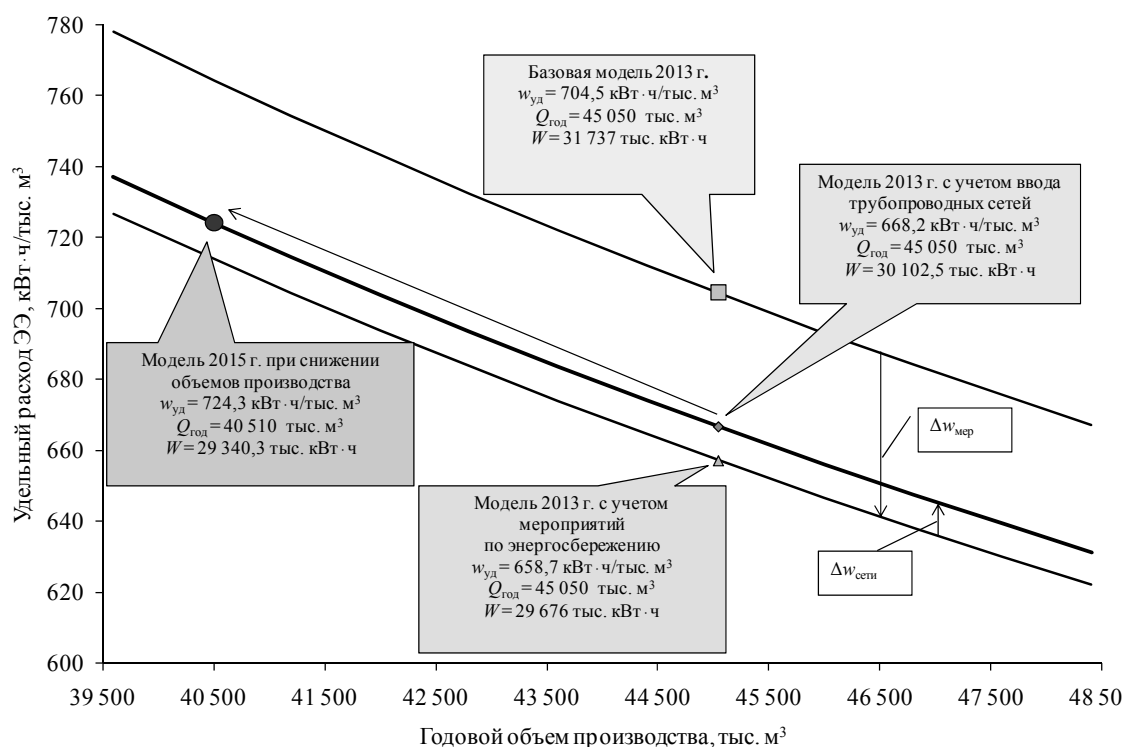


Рис. 6. Изменение удельного расхода электрической энергии при внедрении энергосберегающих мероприятий и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей на примере системы водоснабжения г. Гомеля

При выполнении задания № 2.2.36 «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции» ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» проводились исследования структуры потребления ТЭР 120 промышленных предприятий различных отраслей промышленности и оценка влияния условно-постоянной составляющей ТЭР на ЭЭФ производства при изменении производственной программы [8, 9].

Начиная с 2019 г. научная группа проводит исследования режимов потребления газа в региональных системах газоснабжения (РСГС) Республики Беларусь. В 2019–2020 гг. выполнялось задание 1.2.25 «Разработка методического обеспечения для принятия решений при формировании режимов потребления газа для региональных систем газоснабжения» ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2019–2020 гг. В настоящее время выполняется задание 1.1.10 «Системные исследования режимов регионального газоснабжения для обеспечения устойчивого функционирования энергетического комплекса Республики Беларусь» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» [6, 10–12]. В 2021 г. впервые для Гродненской региональной системы газоснабжения разработаны структурные поля суточного потребления газа от среднесуточной температуры наружного воздуха « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » по 6 укрупненным балансовым группам (УБГ): УБГ «Энергетика», УБГ «Сельское хозяйство, кооперация», УБГ «Комбыт («Минжилкомхоз»», УБГ «Население», УБГ «Промышленность», УБГ «Прочие». Для каждой балансовой группы определен вид структурного поля « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » (рис. 7 и 8) и доказана устойчивость вида во времени:

– поле с четким расслоением $b_{\text{сут}}$ на две температурные области, определяемые состоянием системы отопления («включено» – синяя область на рис. 7, либо «отключено» – красная область на рис. 8) и перекрытием этих областей в зоне неустойчивого, неопределенного состояния РСГС (от 0 до 8 °С) (ГродноРСГС – в целом, УБГ «Минжилкомхоз», УБГ «Энергетика»);

– поле однородного вида (рис. 2) без расслоения $b_{\text{сут}}$ на выраженные температурные области, с некоторой зависимостью роста суточного потребления газа при снижении температуры наружного воздуха при значительном вертикальном разбросе $b_{\text{сут}}$, соответствующих одному и тому же значению температуры наружного воздуха (УБГ «Промышленность», УБГ «Прочие», УБГ «Сельское хозяйство, кооперация»).

Разработаны математические модели взаимосвязи суточного расхода газа от температуры наружного воздуха, определены сезонные коэффициенты и условно-постоянная расхода газа, не зависящая от изменения среднесуточной температуры наружного воздуха.

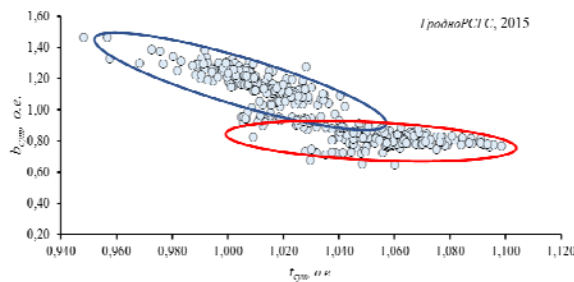


Рис. 7. Структурное поле « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » с четким расслоением $b_{\text{сут}}$ на две температурные области, определяемые состоянием системы отопления («включено» – синяя область, либо «отключено» – красная область)

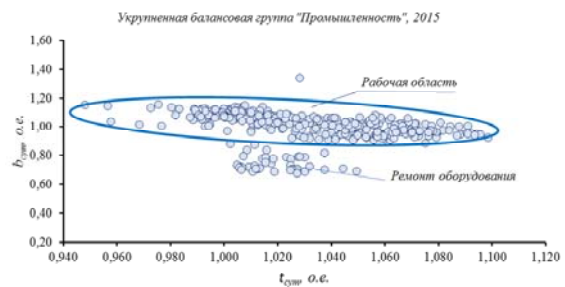


Рис. 8. Структурное поле « $b_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » однородного вида без расслоения на выраженные температурные области

Проводимые исследования научной группы направлены на решение важнейших государственных задач. Так, в 2021 г. начато выполнение задания 1.1.11 «Методика оценки энергоэффективности промышленных производств с газовым печным оборудованием для обеспечения устойчивого функционирования и развития энергетического комплекса Республики Беларусь» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2025 гг., № государственной регистрации 20211650 от 26.05.2021 г.

Литература

1. Петухова, Р. В. О проблемах управления энергоэффективностью производства листового стекла / Р. В. Петухова, Н. В. Грунтович, Е. Л. Шенец // Энергоэффективность. – 2014. – № 3. – С. 24–27.
2. Грунтович, Н. В. Влияние структуры потребления ТЭР предприятия на эффективность внедрения мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Е. Л. Шенец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2014. – № 2. – С. 58–66.
3. Грунтович, Н. В. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2015. – № 3. – С. 20–23.
4. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н. В. Грунтович [и др.] // Вестн. Чуваш. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 40–48.
5. Грунтович, Н. В. Прогнозирование энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения при внедрении мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2016. – № 1. – С. 44–48.
6. Грунтович, Н. В. О необходимости изучения структуры и закономерностей функционирования региональных систем газоснабжения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, В. Е. Шалоник // Энергет. стратегия. – 2017. – № 1. – С. 42–46.
7. Развитие методического обеспечения для диагностирования энергетической эффективности / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 1 (94). – С. 8–13.
8. Использование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 3 (96). – С. 7–11.
9. Мороз, Д. Р. Региональная система газоснабжения с позиций системного анализа и закономерности ее функционирования / Д. Р. Мороз, Н. В. Грунтович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 359–371. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371
10. The study of structural fields of daily gas consumption of the balance groups of the regional gas supply system / D. Moroz [at al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – P. 01066. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801066 HSTED-2020
11. Regularities of the formation of structural fields of daily gas consumption of the regional gas supply system / D. Moroz [at al.] // In E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – P. 01076.
12. Using models of energy consumption from influencing factors to assess the current state and energy efficiency forecasting / D. Moroz [at al.] // In E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – P. 01024.