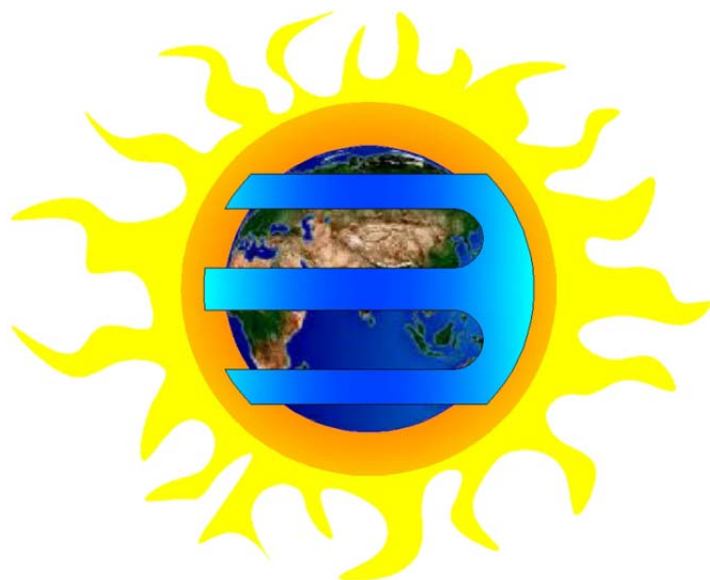


**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет**



**ЛЕКЦИИ**

**Международной конференции с элементами научной школы**

**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**

**23-25 апреля 2014 года**

**Тамбов 2014**

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет**

**ЛЕКЦИИ**

**Международной конференции с элементами научной школы**

**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**

**Рекомендовано к изданию  
научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «ТГТУ»**

**Тамбов 2014**

УДК 658.26  
ББК 31.3

*Материалы, вошедшие в сборник, сохраняют авторскую редакцию*

Редакционная коллегия:

**Т.И. Чернышова** – *ответственный редактор,*  
**С.Н. Баршутин** – *зам. ответственного редактора,*  
**С.П. Москвитин, М.В. Макарчук, В.Н. Чернышов, Д.Ю. Муромцев,**  
**А.П. Пудовкин, Н.П. Жуков, А.В. Кобелев**

**А 43 Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах:** международная конференция с элементами научной школы. Тамбов, 23-25 апреля 2014г. / Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2014. - 124 с.

В сборник включены лекции ведущих ученых в соответствии с тематикой международной конференции с элементами научной школы: «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах».

Предназначен для преподавателей, аспирантов и студентов для использования в научной работе и учебной деятельности.

Международная конференция с элементами научной школы проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14-08-06024 Г\_2013).

УДК 658.26  
ББК 31.3

© Авторы публикаций, 2014  
© ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014  
© Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1.

***Зайченко В.М.***

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ МАЛОЙ  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ..... 4

Лекция 2.

***Крюков Ю.А. Сахаров Ю.С.***

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
МАЛЫХ ПОСЕЛЕНИЙ..... 17

Лекция 3.

***Патрикеев Л.Н.***

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА..... 33

Лекция 4.

***Муромцев Д.Ю.***

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ..... 59

Лекция 5.

***Фокин В.М.***

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СТЕКЛОПАКЕТОВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ..... 74

Лекция 6.

***Шахнов В.А***

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР В СФЕРЕ  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ..... 88

Лекция 7.

***Бородуля В.А.***

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ  
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОТЛОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ..... 103

**Зайченко В.М.**  
**КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ**  
**ЭНЕРГЕТИКИ**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки*  
*Объединенный институт высоких температур РАН*  
zaitch@oivtran.ru

Распределенная энергетика подразумевает использование энергогенерирующих установок относительно небольшой мощности (от долей до нескольких десятков мегаватт электрической и такого же диапазона тепловой мощности), создаваемых под нужды конкретного потребителя. Объекты распределенной энергетики самостоятельно формируют стоимость своей энергии, работают по собственному графику и, как правило, не имеют выхода своей продукции за пределы объекта [1]. Необходимость создания и внедрения средств распределенной генерации продиктована, прежде всего, экономическими причинами. Для реализации программы развития распределенной энергетики комиссией по высоким технологиям и инновациям при Правительстве РФ разработана технологическая платформа «Малая распределенная энергетика», практическим результатом работы которой является типизация оборудования и проектирование вариантных модулей объектов малой распределенной энергетики на основе отдельных сочетаемых элементов (разные типы генерации, локальные сети, средства контроля и автоматизации, средства накопления энергии, др.). Такой подход обеспечит ускорение циклов «запуска» новых разработок в производство, минимизацию расходов на внедрение и распространение нового оборудования, специализацию сервисной и информационной сети и т.д.

**Цель Технологической платформы** состоит в инновационно-технологическом обеспечении структурной перестройки российской энергетики путем перехода от традиционного развития энергетики, как жестко централизованной системы с преобладанием крупных источников генерации, к разнообразию типов и форм развития энергетики в соответствии с особенностями спроса конкретных потребителей, конкретных локальных условий развития и требованиями государственной политики по повышению энергетической эффективности России.

**Основными задачами Технологической платформы** являются:

- Формирование Целевого видения инновационного технологического развития малой распределенной энергетики России;
- Разработка Дорожной карты формирования рыночных, институциональных, научно-технических и иных условий развития малой распределенной энергетики России;
- Разработка Долгосрочного стратегического плана НИОКР и Плана мероприятий по распространению инноваций в малой распределенной энергетике;
- Разработка Концепции и Программы реализации пилотных проектов технологического развития малой распределенной энергетики России;
- Разработка и практическая реализация Плана институционального обеспечения решения задач Технологической платформы (включая взаимодействие с органами местного самоуправления, исполнительной власти, с законодательными органами, другими институтами, продвижение корректировок нормативно-правовой базы и другое);
- Информационно-аналитический сервис для участников платформы, для потребителей, инвесторов, операторов малой распределенной энергетики, органов власти, экспертного сообщества и других заинтересованных сторон на основе открытости и доступности информации.
- Организация экспертизы многочисленных инициатив и предложений участников рынка.

**Основные направления Технологической платформы** связаны с развитием:

*Технологий когенерации электрической и тепловой энергии*

Двигатели для энергетических установок: ГТУ, микротурбины, газопоршневые, новые энергоустановки на основе двигателей внешнего сгорания и другие.

Энергоустановки со сжиганием твердого топлива в кипящем слое.

Топливные элементы, водородная энергетика.

*Технологий эффективного использования энергии в локальных энергосистемах*

Накопители энергии: химические, инерционные, гравитационные, др.

Системы автоматизации управления энергией («микрогрид»).

Новые технологии построения локальных электрических сетей.

*Технологий использования местных энергетических ресурсов, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и биоэнергетика*

Современные технологии использования торфа как топливного ресурса.

Газификация местных топливных ресурсов, отходов производства и бытовых отходов с использованием синтез газа для генерации энергии.

Использование ВИЭ в комплексных локальных энергетических системах, комбинирующих генерацию на основе топлива с использованием энергии солнца (фотовольтаика, коллекторы, др.), ветра (ВЭС), малых рек (мини ГЭС) и др.

*Ресурсосберегающих технологий в локальных сетях ресурсоснабжения*

Тепловые насосы.

Энергосбережение и рекуперация тепла в системах отопления, вентиляции и кондиционирования, водоснабжения и водоотведения, других ресурсоснабжающих локальных сетях.

Локальные системы газоснабжения, системы хранения сжиженного газового топлива (газгольдеры).

*Смежных энергосберегающих строительных технологий*

Технологии низких тепловых потерь (дома с «нулевым» теплорасходом).

Комплексные строительные, энергетические, инженерные и архитектурно-планировочные решения поселений и малых городов в целях стандартизации и эффективного использования средств малой распределенной энергетики.

Рассмотрим некоторые из перечисленных выше направлений. Когенерационные технологии производства электрической и тепловой энергии являются наиболее выгодными, поскольку позволяют увеличить степень использования топлива. Но тепловую энергию нельзя передавать на большое расстояние. В силу этих причин при совместном производстве тепловой и электрической энергии источник должен быть расположен в непосредственной близости от потребителя. В противном случае когенерационный цикл становится невозможным.

В западных странах переход на совместное производство электрической и тепловой энергии осуществлялся в течение последних десятилетий. На сегодняшний день потенциал возможного

использования когенерационного цикла на Западе практически исчерпан. Дальнейшее увеличение производства энергии связано для Запада с определенными трудностями. Собственных топливных ресурсов недостаточно, обеспечение возможности поставок топлива с недружелюбного для Запада Ближнего Востока требует значительных материальных затрат. При этом твердых гарантий в неизменной лояльности, даже при условии постоянных воздействий военного, политического и экономического плана на нефтеносные страны, для западных стран нет. Другой источник энергетических ресурсов – Россия, которая всегда остается для западного мира непонятной. Стремление обеспечить собственную энергетическую независимость заставляет западные страны идти на использование более дорогих источников энергии, к которым и относятся ВИЭ. Во многих случаях возобновляемая энергетика для западных стран по сути дела является единственной альтернативой для обеспечения энергетической безопасности. При этом весьма вероятно, что все рассуждения относительно экологической безопасности во многом являются некоторым прикрытием для оправдания использования более дорогих методов генерации по отношению к традиционным, базирующимся на использовании ископаемых топлив.

Таковы причины, которые привели к опережающему развитию возобновляемой энергетики в западном мире. Для того чтобы уменьшить для потребителя цены на энергию, получаемую с использованием ВИЭ, были введены соответствующие дотации из бюджета. Положительная динамика экономического развития западных стран в течение долгого времени создавала впечатление, что бюджетных средств будет достаточно не только для обеспечения традиционных статей расхода, которыми во всех странах являются медицина, образование, покрытие социальных нужд, военные расходы и т.д., но и для обеспечения новой статьи расходов, связанной с внедрением возобновляемой энергетики. Естественно, данная практика, определяющая расходование бюджетных средств в новом направлении, активно лоббировалась перед правительствами и парламентами западных стран определенными промышленными кругами, заинтересованными в развитии данного направления техники. В принципе, таких примеров, когда со стороны представителей определенных направлений промышленного производства проявляется повышенная активность, направленная на



привлечение бюджетных средств для дотирования тех или иных видов продукции, достаточно много. Как правило, направления подобной активности чередуются: на смену одним предложениям о необходимости бюджетного дотирования приходят другие, и т.д. Во многих случаях, когда это касается оборонных отраслей, освоения космоса, культуры, искусства, такая политика может дать положительные результаты, в том числе в плане поддержки национального самосознания и престижа государства. В плане энергетического строительства это, видимо, несправедливо: энергетика, являющаяся производственной отраслью, должна обеспечивать отчисления в бюджет, а не расходовать бюджетные средства. Кроме того, ориентация на бюджетные дотации при использовании возобновляемой энергетики привела к резкому снижению уровня исследований и разработок в данной области. Тем не менее, такое состояние дел в области разработок и создания новых методов возобновляемой энергетики в западных странах могло и далее развиваться подобным образом, если бы не экономический кризис, резко сокративший возможности бюджетных расходов. На сегодняшний день темпы роста возобновляемой энергетики в европейских странах сокращаются.

В нашей стране в настоящее время региональные власти рассматривают энергетику в качестве источника бюджетных доходов. При сооружении собственных энергетических объектов определенная часть бюджетных отчислений, получаемых при эксплуатации данного объекта, поступает в региональную казну. В случае если электроэнергия поступает из других регионов, то соответствующие бюджетные отчисления остаются в том регионе, в котором эта энергия производится. В качестве примера, демонстрирующего заинтересованность местных органов власти во внедрении средств распределенной генерации, можно привести создание газопоршневой когенерационной установки в качестве надстройки для котельной Специальной астрофизической лаборатории РАН в поселке Нижний Архыз, расположенном в Зеленчукском районе Карачаево-Черкесии (см. рис. 1). Общие затраты на сооружение данной мини-ТЭЦ составили около 14 млн. руб., суммарные бюджетные отчисления при ее работе в бюджеты всех уровней – около 8 млн. руб. в год.

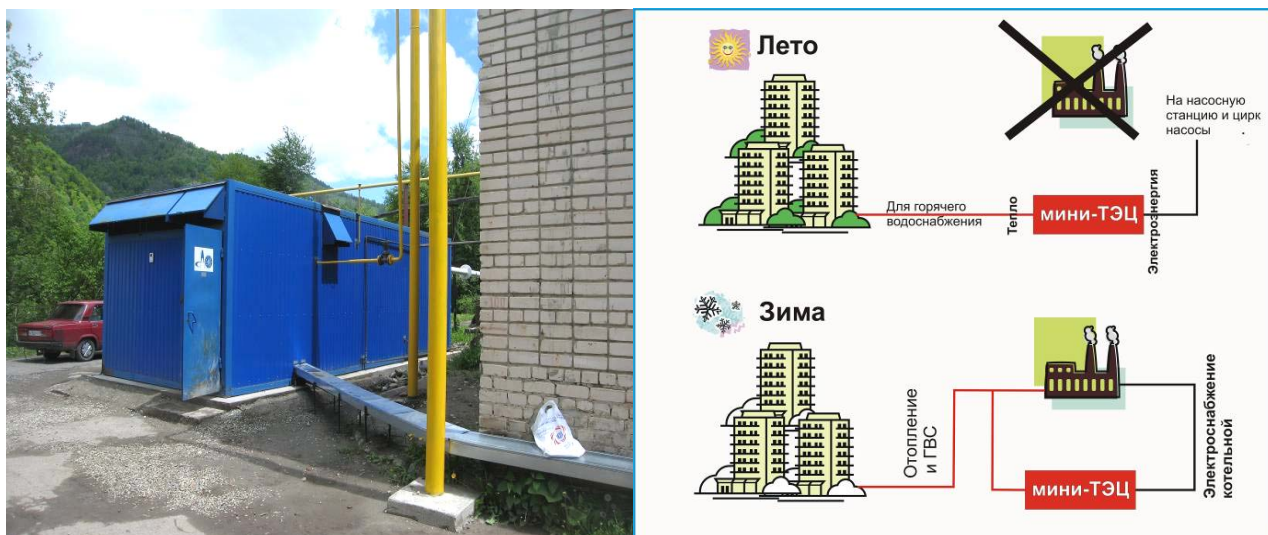


Рис. 1 Внешний вид и принципиальная схема функционирования мини-ТЭЦ.

Пример, приведенный выше, касается использования мини-ТЭЦ, работающей на природном газе. Подобная техника в настоящее время достаточно широко используется в нашей стране. Согласно существующим оценкам, экспорт различных энергоустановок на базе газопоршневых двигателей в нашу страну составляет, примерно 4 млрд. долларов США в год. Собственное производство практически отсутствует. Точных данных относительно располагаемого производства отечественных электростанций и мини-ТЭЦ нет. Согласно косвенным данным, объем производства нескольких небольших отечественных организаций, занимающихся изготовлением энергоустановок на базе газопоршневых двигателей, не превышает 0,3 - 0,4 млн. долларов США в год.

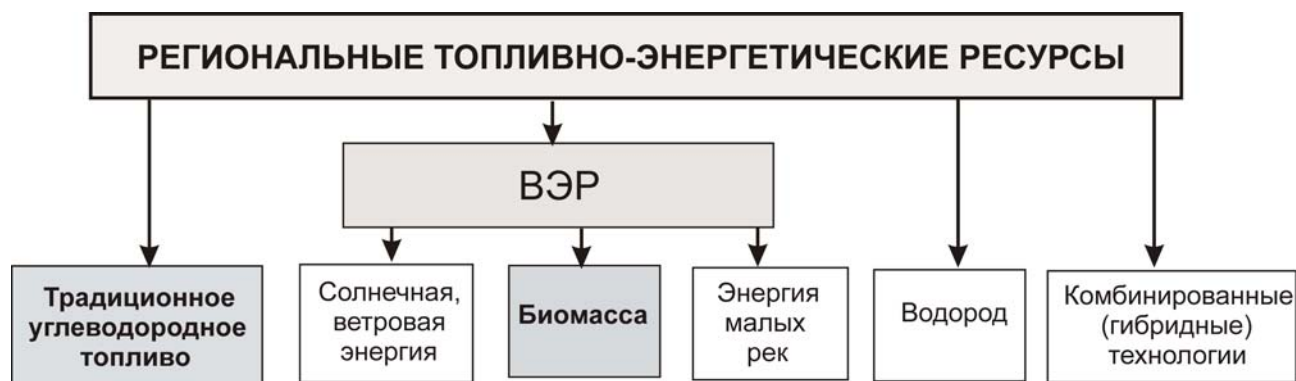


Рис. 2 Региональные топливно-энергетические ресурсы для распределенной энергетики.

В регионах в качестве сырьевой базы для развития распределённой энергетики рассматриваются возможности использования различных местных топливно-энергетических ресурсов (см. рис. 2).

Если говорить о биомассе, то, прежде всего, это – отходы лесозаготовок и деревообрабатывающей промышленности, отходы сельскохозяйственного производства, торф. Известно, что наша страна занимает первое место в мире по запасам торфа и древесины. Отметим, что в сравнительно недалеком прошлом торф играл значительную роль в топливно-энергетическом балансе страны. Для энергетического использования торфа, как впрочем, и других видов биомассы, должны быть разработаны и внедрены технологии нового поколения, соответствующие современным требованиям. Рассмотрим некоторые из таких технологий.

## 1. КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА МЕСТНЫХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСАХ

В стране газифицированы не все регионы. Для того чтобы получать электроэнергию из местных топливно-энергетических ресурсов необходимы технологии получения газообразного топлива из располагаемой биомассы (торф, древесные и сельскохозяйственные отходы). Получаемый газ может быть использован в газотурбинных и газопоршневых установках. Согласно анализу заявок на подключение, наиболее востребованные мощности находятся в интервале 200-300 кВт. С точки зрения экономики при мощностях менее 3 МВт наиболее целесообразным является использование газопоршневых установок, при больших мощностях – газотурбинных [1].

К настоящему времени известны две технологии получения газообразного топлива при термической переработке биомассы: газификация и пиролиз. При пиролизе (нагрев перерабатываемого материала без доступа окислителя) возможно получение энергетического газа с теплотой сгорания до 20 МДж/м<sup>3</sup>. Побочными продуктами пиролиза является твердая и жидкая фаза реакции. Тепло-содержание получаемой газообразной фазы не превышает 25% от энергии, запасенной в перерабатываемой биомассе. Оставшаяся энергия распределяется между жидкой и твердой фазами. С экологической точки зрения жидкая фаза пиролиза небезопасна, ее переработка либо утилизация связана со значительными трудностями. В силу этих причин процессы пиролиза на практике не применяются. При воздушной газификации осуществляется безотходная перера-

ботка перерабатываемого сырья, но теплота сгорания получаемого энергетического газа не выше  $6 \text{ МДж/м}^3$ . К тому же он содержит до 40% азота. Использование газа с низкой теплотой сгорания в современных энергетических агрегатах, рассчитанных на высокие тепловые нагрузки, неэффективно.

Для эффективного энергетического использования биомассы необходима разработка экологически безопасного процесса получения энергетического газа с достаточно высоким уровнем тепло-содержания, обеспечивающим возможность его использования в современном энергетическом оборудовании, и высоким коэффициентом конверсии исходного сырья.

Технология двухстадийной термической конверсии биомассы с получением газа с высокими теплотехническими характеристиками предложенная в Объединённом институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН) [2, 3], обладает рядом достоинств как по сравнению с традиционным пиролизическим методом, так и с методом воздушной газификации.

Суть метода состоит в том, что газы и летучие, образующиеся в процессе нагрева исходного сырья, фильтруются через пористую углеродную среду, поддерживаемую при фиксированной температуре  $T_\phi$ . В качестве углеродной среды используется угольный остаток, полученный в результате пиролиза исходного сырья. В результате протекания гомогенных и гетерогенных химических реакций имеет место интенсивное разложение пиролизных газов и паров. Степень преобразования зависит как от температуры  $T_\phi$ , так и от времени взаимодействия пиролизных газов и паров с нагретой углеродной поверхностью. Увеличение температуры углеродной среды приводит к интенсификации как процесса гетерогенного пиролиза газообразных углеводородов и высокомолекулярных органических соединений, так и процесса восстановления двуокиси углерода до СО (реакция Будуара). Взаимодействие пирогенетической воды с углеродом (реакция паровой конверсии), в свою очередь, приводит к образованию водорода и окиси углерода. При температуре  $T_\phi = 1000^\circ\text{C}$  и соответствующем времени взаимодействия жидкая фракция в продуктах конверсии на выходе из реактора отсутствует, что свидетельствует о ее полном превращении в газ. В результате при  $T_\phi = 1000^\circ\text{C}$  получаемая газовая смесь представляет собой синтез-газ с примерно равным объемным содержанием водорода и окиси углерода.

В таблице 1 представлен состав газообразных продуктов на выходе из реактора, получаемых по предлагаемой технологии в зависимости от температуры  $T_{\phi}$  [4].

Таблица 1. Состав, объем и теплота сгорания газовых смесей, полученных путем термической переработки торфа [4].

$T_{\phi}, ^\circ\text{C}$	Объемная доля горючих компонент			Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>		Объем, м <sup>3</sup> /кг	Эффективность конверсии
	H <sub>2</sub>	CO	CnHm	Q <sub>B</sub>	Q <sub>H</sub>	V	$\eta$
850	0,40	0,27	0,08	11,7	10,6	0,76	0,42
950	0,43	0,40	0,02	11,3	10,4	1,1	0,59
1000	0,49	0,41	0,01	11,7	10,6	1,39	0,76
Пиролиз (10град/мин)	0,23	0,19	0,13	10,4	9,6	0,29	0,14

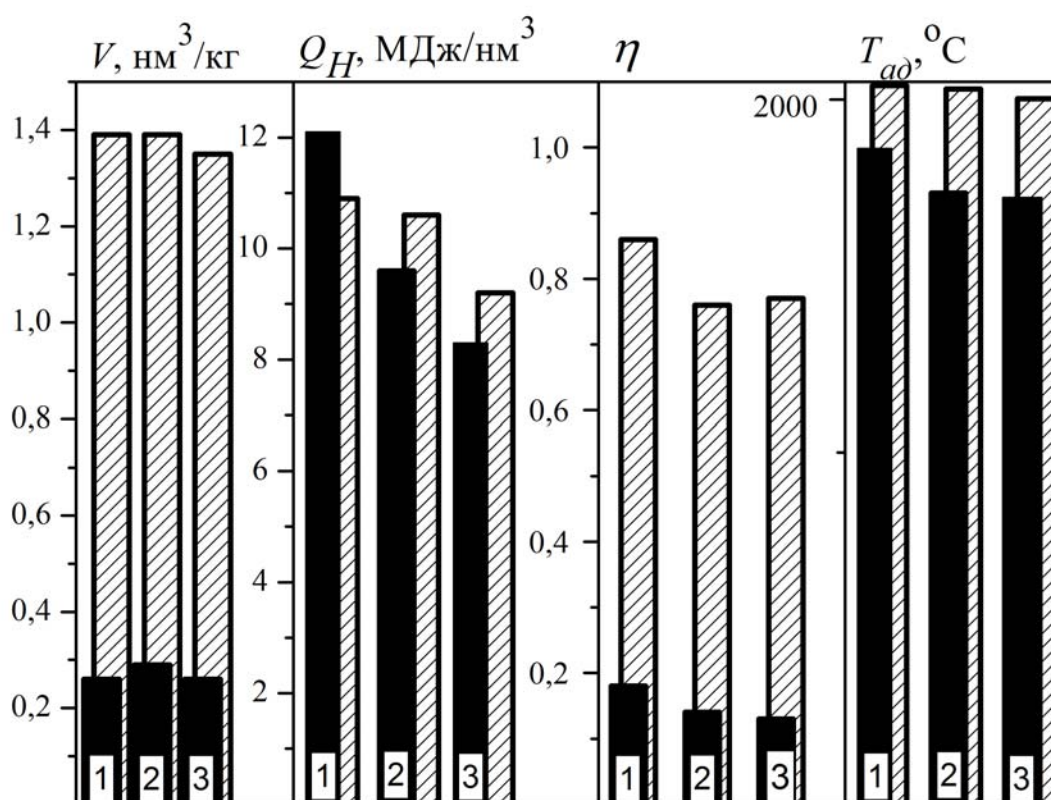


Рис. 3 Сопоставление параметров, характеризующих различные режимы термической переработки древесины (1), торфа (2) и соломы (3): заштрихованные области – двухстадийный пиролиз при  $T_{\phi} = 1000^\circ\text{C}$ , сплошные области – традиционный пиролиз [2].

На рис. 3 приведены данные по эффективности энергетической конверсии  $\eta$  (определенной как отношение теплоты сгорания полученного газа к теплоте сгорания использованного исходного сырья), объему  $V$ , низшей удельной теплоте сгорания  $Q_H$ , и адиабатической температуре  $T_{ad}$  горения газовых смесей, получаемых при использовании различных способов термической переработки древесных и торфяных пеллет, а также пеллет из соломы. Из сопоставления данных, приведенных на рис. 4 видно, что значения  $Q_H$  и  $T_{ad}$  для газовых смесей, получаемых в результате термической переработки различных видов биосырья методом двухстадийного пиролиза при  $T_\phi = 1000^\circ\text{C}$  и традиционным пиролитическим методом, близки между собой. Основными достоинствами предлагаемого метода является, во-первых, возможность существенного повышения удельного выхода газовой составляющей при сохранении достаточно высоких значений удельной теплоты сгорания, и как следствие, значительного повышения степени конверсии твердого углеводородного сырья в синтез-газ, и, во-вторых, эффективная и экологически чистая утилизация жидких продуктов пиролиза.

Предлагаемая технология позволяет осуществить эффективную безотходную переработку местных топливно-энергетических ресурсов, в первую очередь древесных и сельскохозяйственных отходов, торфа, с получением энергетического газа с высокими теплотехническими параметрами, который может быть эффективно использован непосредственно для производства электрической и тепловой энергии, в том числе в мини-ТЭЦ на базе газопоршневого двигателя.

## 2. ПОВЫШЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ (ТОРРЕФИКАЦИЯ)

Биомасса всегда использовалась в качестве твердого топлива. В последнее десятилетие для увеличения насыпной плотности, что в первую очередь относится к сельскохозяйственным отходам, и объемного энергосодержания применяется, так называемая пеллетизация. К настоящему времени производство пеллетизированного топлива в мире достигло нескольких миллионов тонн в год и продолжает увеличиваться. Основными сдерживающими факторами энергетического использования пеллет из различных видов биомассы являются трудности, с которыми приходится сталкиваться при организации их перевозки и хранения. Пеллеты активно впитывают

влагу, при достижении определенной влажности разбухают и разваливаются. Необходимо соблюдение специальных условий, исключающих возможность контакта пеллетизированной продукции с воздушной средой, которая сможет явиться источником поступления влаги в пеллеты. Для повышения потребительских свойств твердого топлива из биомассы применяется торрефикация, т.е. термическая обработка биомассы при температурах 200–300°C в безокислительной среде. В результате торрефикации пеллеты становятся гидрофобными – резко снижается их способность поглощать влагу. При исходной влажности пеллет 6–7% хранение в естественных условиях в течение месяца – двух (в зависимости от времени года) приводит к увеличению влажности до 18–22%. При торрефикации происходит не только сушка исходного сырья, но и термическая деструкция гемицеллюлозы, входящей в состав биомассы. При этом плотность перерабатываемого материала уменьшается, а теплота сгорания увеличивается. Торрефикация при 270°C и соответствующем времени выдержки позволяет увеличить теплоту сгорания пеллет из различных видов биомассы на 30–40% [5].

В настоящее время считается, что торрефикация пеллетизированной биомассы является основным направлением улучшения потребительских свойств данного вида топлив. Практическая реализация технологии торрефикации будет способствовать более широкому использованию данного вида топлив в энергетике.

Исследования по разработке технологии торрефикации ведутся во многих научных центрах мира. Но к настоящему времени промышленного варианта технологии торрефикации не создано. В настоящее время в ОИВТ РАН отрабатывается схема, которая позволяет проводить торрефикацию топлив экономически оправданными методами. [6] Построена установка производительностью 50–70 кг в час по перерабатываемому сырью, на которой проводится отработка режимные параметры процесса. Принципиальная схема и общий вид установки представлен на рис. 4 и 5.



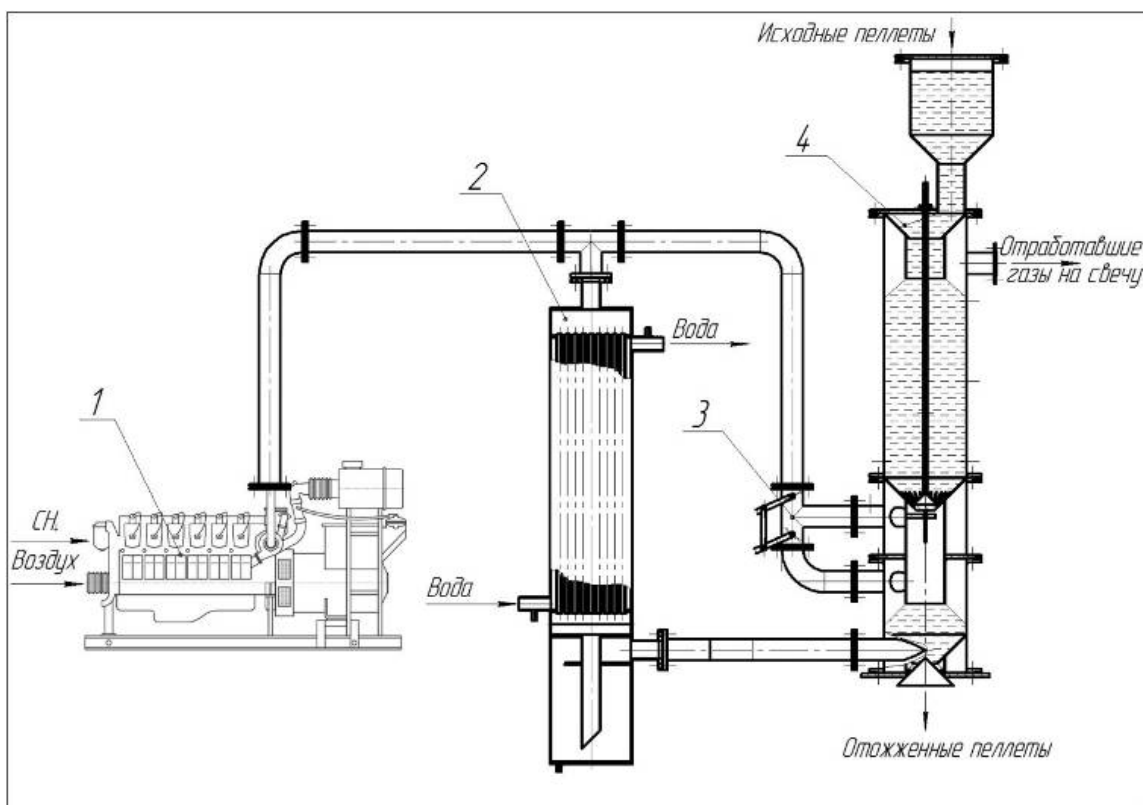


Рис. 4 Принципиальная схема установки по торрефикации [6]



Рис. 5 Общий вид установки по торрефикации

Особенностью предложенной схемы является использование в качестве газа-теплоносителя выхлопных газов двигателя внутрен-



него сгорания. Тем самым решаются две задачи. Во-первых, за счет высокого коэффициента теплообмена обеспечивается эффективный нагрев перерабатываемого сырья (по сравнению со схемами, в которых подвод тепла осуществляется через стенку реактора). Во-вторых, предложенная схема, по сути, представляет собой когенерационную установку, позволяющую вырабатывать электроэнергию и утилизировать производимое при этом тепло в целях повышения потребительских свойств твердого гранулированного топлива из биомассы. Такой подход существенным образом улучшает экономические показатели процесса торрификации и делает его экономически целесообразным.

Следующим шагом в создании промышленной технологии торрефикации должна быть отработка данной схемы в опытно-промышленных условиях.

### *Список литературы*

1. Зайченко В.М., Цой А.Д., Штеренберг В.Я. Распределенное производство энергии. Москва. Бурос. 2008. 207 с.
2. Батенин В.М., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А. Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо. Доклады Академии наук, 2012, том 446, №2, стр. 179-182.
3. V.V. Kosov, V.F. Kosov, I.L. Maikov, V.A. Sinelshchikov, V.M. Zaichenko. High calorific gas mixture produced by pyrolysis of wood and peat. The Proceedings of 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June - 3 July 2009, Hamburg, Germany. P. 1085 – 1088.
4. В.М. Батенин, А.В. Бессмертных, В.М.Зайченко, В.Ф. Косов, В.А. Синельщиков. Термические методы переработки древесины и торфа в энергетических целях. Теплоэнергетика. 2010, № 11, стр. 36-42.
5. V.F. Kosov, G.A. Sytchev, V.A. Sinelshchikov, V.M. Zaichenko Influence of Torrefaction on the Fuel Characteristics of Different Biomass Materials. The Fourth International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies (BIONATURE 2013) Mach 24-29, 2013, Lisbon, Portugal. P. 29-32.
6. Бессмертных А.В, Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А. Установка по торрификации биомассы. Материалы V Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», Махачкала, 2012, стр. 216-219

**Крюков Ю.А. Сахаров Ю.С.**  
**АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ**  
**МАЛЫХ ПОСЕЛЕНИЙ**  
Университет «Дубна»  
[kua@uni-dubna.ru](mailto:kua@uni-dubna.ru), [sakharovu@yandex.ru](mailto:sakharovu@yandex.ru)

*Электрическая энергия остается наиболее удобным и востребованным видом энергии, передаваемой от крупных электростанций к многочисленным потребителям. Устаревшие линии передачи и оборудование подстанций в некоторых случаях преобразуют в тепловые потери до четверти сгенерированной мощности. Линии электропередачи длиной в десятки тысяч километров способны создавать и обслуживать только очень крупные корпорации, естественно превращающиеся в безальтернативные «естественные монополии». Формирование конкурентной среды для множества продавцов и потребителей электроэнергии в городе, поселке или даже деревне на основе автономных резонансных линий передачи электроэнергии и данных представляется перспективной задачей современной России.*

### **Актуальность**

В настоящее время в мировой практике наблюдается активное внедрение объектов распределенной электрогенерации, включающие малые газотурбинные и газопоршневые станции, ветрогенераторы, солнечные фермы, биогенераторы, микрогидроэлектростанции и другие объекты, находящихся во владении конечных пользователей. Так в Канаде установленная мощность на возобновляемых источниках электроэнергии составляла уже в 2000 году около 500 МВт. В Западной Европе мощность распределенной генерации оценивалась в 2002 году в 50 ГВт, включая малые ГЭС и ветрогенераторы. По данным Министерства энергетики США, опубликованным в 2007 году, в стране было установлено около 12 миллионов блоков, которые можно отнести к категории распределенной генерации в собственности у конечных пользователей, с суммарной мощностью более 200 ГВт [1].

Распределенная генерация электроэнергии в непосредственной близости от объектов потребления устраняет необходимость сооружения региональных электростанций и дополнительной сетевой инфраструктуры, обеспечивает сглаживание пиковых значений

потребления, создает условия для ускоренного наращивания мощности для развития экономики региона. Наличие источников в непосредственной близости от нагрузки увеличивает надежность электроснабжения, способствует обеспечению должных уровней напряжения в сети, снижает риск потери устойчивости системы.

Капитальные затраты на сооружение объекта распределенной генерации несет его собственник, вследствие чего отсутствует необходимость добавлять инвестиционную составляющую тарифа в счета всех ранее уже подключенных потребителей сети. В результате снижается тарифная нагрузка на потребителей, обслуживаемых энергосистемой, происходит сдерживание инвестиционных затрат. Кроме того, финансовые риски, связанные с объектами малой и средней генерации, намного ниже, чем для объектов с большой установленной мощностью.

В последнее время процесс ввода в эксплуатацию оборудования распределенной генерации начинает набирать обороты и в России. Так, по данным таможенных органов за последние два года в Россию импортировано оборудования малой и средней генерации общей мощностью 1200 МВт. Однако в нашей стране, несмотря на переход к рыночным структурам в электроэнергетике, во многом сохраняется традиция централизованного перспективного планирования развития системы как в области электрогенерации, так и сетевого хозяйства, не предполагающая даже в перспективе интеграцию объектов малой и средней генерации в существующую сетевую инфраструктуру.

Обсуждаемая концепция развития электроэнергетики на основе крупных генерирующих станций (Энергетическая стратегия России на период до 2030 года и Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2020 года с перспективой до 2030 года), опирающихся на магистральные линии электропередачи с огромной протяженностью, не сможет обеспечить прорывное повышение динамики развития регионов страны. Инвестиции в строительство «умных распределительных сетей», являющиеся главным посылом концепции, призванным изменить ситуацию с надежностью и эффективностью электропередачи, непременно лягут тяжелым бременем на потребителей в виде инвестиционной составляющей тарифов на период реализации в несколько десятилетий [2]. Такое положение вещей ставит под сомнение саму возможность выполнения в обозримой перспективе планов по модернизации

промышленности и требует внедрения новых решений традиционных задач, в большей степени соответствующих глобальным законам сохранения потока энергии, гармонизирующим развитие значимых отраслей экономики [3].

### **Перспективные задачи**

В этих условиях, с учетом задачи демонополизации региональных рынков электроснабжения, снижения уровня государственного регулирования ценообразования и необходимости привлечения в отрасли прямых инвестиций населения, необходимо заново сформулировать набор требований, предъявляемых к перспективным территориально-распределенным кабельным сетям, обеспечивающим спектр современных услуг:

- технологические и организационные особенности развития кабельной системы должны обеспечивать возможности для *строительства сетей «снизу»*, с уровня сельских поселений и районных центров;

- принципиальные, структурные и топологические схемы территориально-распределенных сетей должны обеспечивать *возможность обмена генерируемой мощностью в двух направлениях* на уровне распределения, а не только на уровне магистральной части системы;

- передача электроэнергии по линиям должна обеспечиваться с повышением потребительских характеристик сетей - *значительным снижением металлоемкости линий* для цветных металлов и *общей стоимости линий* при строительстве, а при эксплуатации электросетей *снижением потерь на разогрев проводников, повышением травмо- и пожаробезопасности*;

- трансляция потоков электроэнергии вдоль кабельной системы должна *совмещаться с высокоскоростной передачей данных* при использовании единой кабельной системы;

- существенное *снижение организационных издержек* компаний и населения не только при присоединении потребителей к сетям передачи электроэнергии для объектов нового строительства, но и при подключении к сетям генерирующих мощностей объектов распределенной и альтернативной энергетики;

- обеспечение непрерывного и *дифференцированного учета генерируемой и потребляемой электроэнергии* всеми участниками рынка, а в перспективе с учетом потребления каждой отдельной розеткой в распределительной сети здания;

- обеспечение *динамического управления параметрами* сложно структурированной сети с присоединенными разнородными источниками и потребителями электроэнергии с целью оптимизации процессов перетока энергии и сокращения технических потерь.

На первый взгляд некоторые из сформулированных требований противоречат друг другу. Например, требование по снижению стоимости строительства погонного метра сетей несовместимо с оснащением каждой электрической розетки программируемым вычислительным устройством, интеграцией в кабельной системе функций передачи электроэнергии и данных, формированием двунаправленного перетока электроэнергии. А строительство сетей «снизу», со случайно возникающими связями без предварительного проектирования (ячеистая топология, применяемая при строительстве линий Интернет) противоречит требованию динамического управления многочисленными электрическими параметрами в единой системе, резко усложняет организацию динамического учета в доленом энергообеспечении потребителя.

Однако, новые подходы к передаче электрической энергии, применение новых конструктивных решений при создании электрораспределительных сетей позволяют дать положительный ответ на вопрос о возможности обеспечения всех вышеизложенных требований в рамках одной кабельной системы.

### **Современное состояние проблемы**

В работах Н.Тесла (Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy. US Pat № 349621, 15.05.1900) был предложен метод передачи электрической энергии с использованием резонансных свойств однопроводной линии, изготовленной из металлического проводника. Этот метод был незаслуженно забыт по причине сложной организации управления резонансными характеристиками линии на основе доступной на тот момент элементной базы. Идеи Теслы были значительно развиты в работах коллектива ученых Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) под руководством директора института академика Д.С. Стребкова [5].

Современные подходы к конструктивным решениям, используемым при строительстве интеллектуальных систем передачи электроэнергии разработаны в малом инновационном предприятии ООО «Мезон», созданном на основе закона №217-ФЗ при Международном университете природы, общества и человека «Дубна» и защищены патентами.

## Суть новой технологии

Конкурентоспособность используемых технологий однопроводной передачи электрической энергии обеспечивается высоким КПД передачи (до 98%) из-за малых потерь на поглощение и излучение энергии. Проводящий канал на основе силового стального компонента стандартного оптоволоконного кабеля в резонансном режиме имеет квазисверхпроводящие свойства. Объяснением этого эффекта является отсутствие активного тока в проводнике с низкой удельной проводимостью и доминирующей ролью в передаче энергии токов смещения. Использование телекоммуникационной инфраструктуры на основе оптоволоконного кабеля позволяет внедрить интеллектуальные технологии управления в распределительных сетях электроснабжения, интегрировать в единой кабельной системе совместную передачу электрической энергии и данных, существенно снизить транспортные потери при поставке электроэнергии потребителю, снизить металлоемкость кабелей для цветных металлов, повысить вандалоустойчивость сетей, электро- и пожаробезопасность системы в целом.

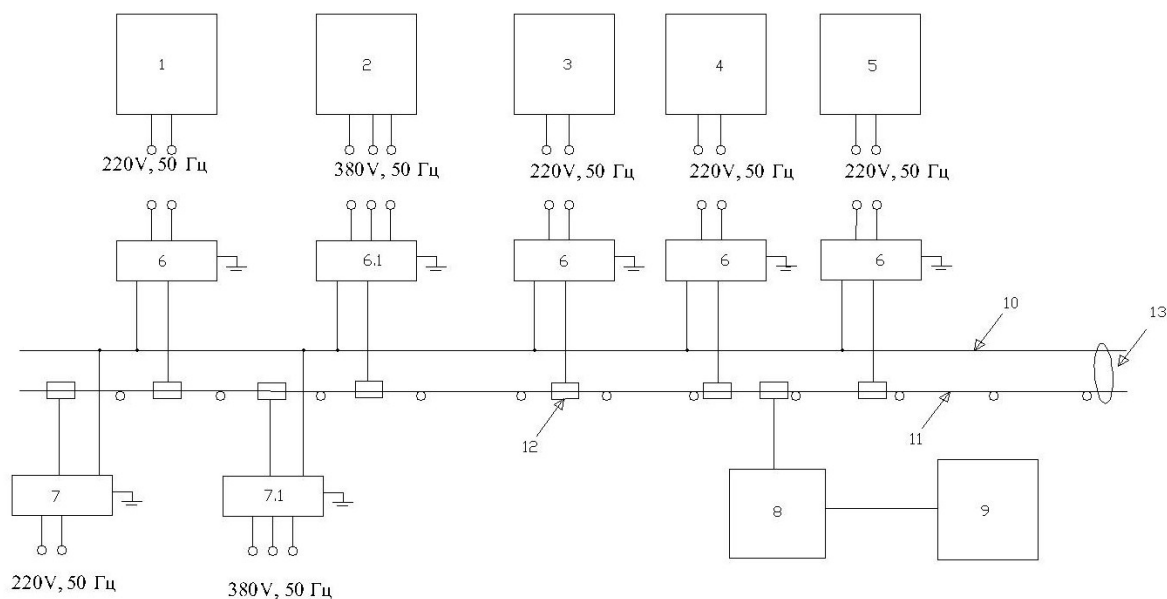


Рис.1 Сегмент сети резонансной системы передачи электрической энергии и данных

Первая интеллектуальная система передачи электрической энергии и данных развернута на территории кампуса университета «Дубна» в июле 2011 года и с момента запуска эксплуатируется в непрерывном режиме. Сегмент сети резонансной системы передачи электрической энергии и данных (Рис.1) в качестве среды передачи использует стандартный оптоволоконный кабель (13), длина кото-

рого может достигать нескольких десятков километров. Резонансные генераторы (РГ) (6) являются преобразователями активной мощности множества территориально-распределенных источников электроэнергии (1-5), таких как солнечные батареи, ветрогенераторы, минигидроэлектростанции, водородные генераторы, приливные электростанции, накопители электроэнергии. РГ имеют подключение как к силовым металлическим компонентам оптоволоконного кабеля (10), так и к информационным оптическим волокнам этого же кабеля (11) посредством оптических ответвителей (12). Аналогичным образом к сегменту сети резонансной системы передачи имеют подключение множество (7) приемников-выпрямителей (ПВ), так же оборудованных микропроцессорной системой обработки данных (устройство «умная розетка»). Информационное пространство сегмента сети обслуживает сервер биллинга и мониторинга (8), в базу данных которого периодически поступают информационные сообщения о мгновенных значениях электрической мощности, генерируемой каждым из подключенных РГ в течение некоторого временного интервала и мощности, потребляемой оборудованием ПВ. Администрирование системы осуществляется оператором, имеющим доступ к оборудованию через Интернет (9).

### **Структура информационного взаимодействия объектов системы**

Резонансные генераторы (РГ), как и приемники-выпрямители (ПВ) могут иметь подключение более чем к одному сегменту резонансной сети (Рис.2). В этом случае РГ и ПВ выполняют функцию согенераторов, обеспечивая, при необходимости, ретрансляцию электроэнергии из сегмента сети с избыточной генерируемой мощностью в энергодефицитный сегмент. Потребители электроэнергии в своей работе опираются на критерии и алгоритмы выбора оптимального пути к требуемому РГ через цепочку согенераторов. Маршрут строится исходя из наличия свободной мощности РГ одного из доступных источников альтернативной электроэнергии с лучшим параметром цена/качество. С целью оптимизации и унификации компонентов системы передачи электрической энергии и данных оборудование РГ и ПВ может быть смонтировано в едином корпусе – клиентском терминале (КТ).

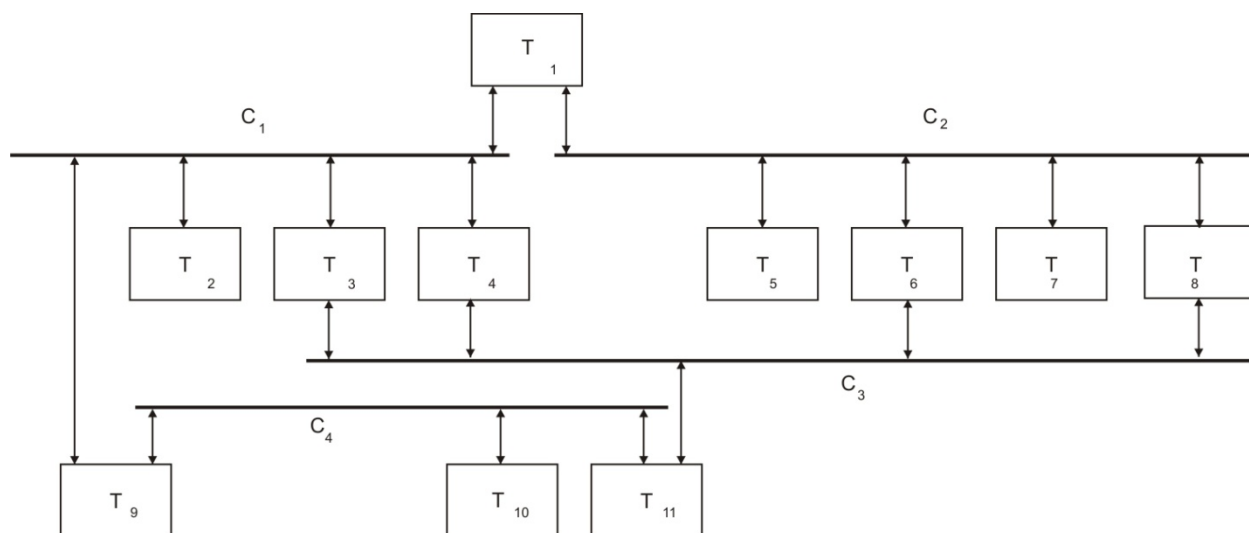


Рис.2 Пример многосегментной системы передачи электрической энергии и данных:

$T_1$ – $T_{11}$  – клиентские терминалы;  $C_1$  –  $C_4$  – сегменты сети резонансной системы передачи

На информационном уровне клиентские терминалы объединяются в традиционную оптоволоконную сеть передачи данных. При подключении более чем к одному сегменту сети КТ выполняют роль маршрутизатора и обеспечивают пользователю удаленный доступ к электронной бирже электроэнергии. Объекты альтернативной энергетики, такие как солнечные панели, ветрогенераторы и др., являются ненадежными источниками электроэнергии, генерируемая мощность которых сильно зависит от текущих погодных условий и времени суток. В связи с этой спецификой работы оборудования и меняющимися текущими потребностями домохозяйства в электрической энергии, клиентские терминалы могут работать в двух режимах – режиме поставки электроэнергии в сеть при излишках генерируемой мощности в домохозяйстве, а также в режиме потребления электроэнергии из сети в случае недостатка в собственной генерации. Объекты альтернативной генерации имеют в своем составе накопители электроэнергии, что позволяет поддерживать необходимое потребление домохозяйства в периоды смены режима работы. КТ динамически и адаптивно меняют свою роль в системе, выступая в роли поставщика электроэнергии с оплатой потребителей на расчетный счет владельца, либо потребителя электроэнергии с оплатой со своего расчетного счета на счет владельца источника электроэнергии, выбранного в качестве текущего по-



ставщика. Дополнительно, КТ могут выступать в роли согенераторов, являясь посредниками между производителем и потребителем электроэнергии, что также требует адаптивного выделения доли от максимально возможной производительности КТ и проведения взаиморасчетов с заказчиком данного транзита. Алгоритмы проведения коммерческих взаиморасчетов выходят за рамки данной статьи, однако необходимо учитывать, что формирование свободного рынка электроэнергии альтернативных источников предполагает возможность для владельца оборудования лично определять цену поставки и транзита электроэнергии другим участникам рынка путем внесения данных в расчетную систему. В связи с этим, технологии автоматической оптимизации маршрутов передачи электроэнергии в многосегментной сети приобретают особую значимость.

### **Формализованное описание структуры системы**

Один из способов построения структуры вычислительного процесса клиентского терминала предусматривает использование алгоритмов автоматической оптимизации на основе математической модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных. С этой целью представим формализованное описание объектов инфраструктуры системы.

**Компоненты системы.** Многоканальная система передачи электроэнергии и данных состоит из трех компонентов.

*Пользователь* – человек, являющийся владельцем оборудования электрогенерации и имеющий возможность определять ценовые характеристики поставки и транзита электроэнергии потребителям посредством доступа к информационно-расчетной системе сети.

*Клиентский терминал* (КТ) – устройство, предназначенное для передачи электрической мощности источника электроэнергии по однопроводной линии сегмента сети, а так же для приема электрической энергии, генерируемой другими источниками, формирования и обработки информационных сообщений в рамках сети передачи данных.

*Канал передачи* (КП) – сегмент оптоволоконного кабеля, являющийся средой для передачи как электрической энергии, так и информационных сообщений.

Многоканальная система передачи электроэнергии и данных (МСПЭД) является «связной», т.е. любой из её КТ имеет возможность передать электроэнергию и данные любому другому КТ, входящему в

состав этой системы, непосредственно либо через промежуточные КТ, используемые в качестве согенераторов и маршрутизаторов.

Пример многоканальной системы передачи электроэнергии и данных показан на рис. 2.

**Требования к модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных.** Основные требования, предъявляемые к математической модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных:

- *полнота модели*, т.е. модель должна описывать МСПЭД с достаточной точностью, не опуская существенно важных параметров;
- *универсальность*, модель должна описывать, по возможности, наибольшее число вариантов построения МСПЭД;
- *минимальное число формальных параметров*, поскольку модель предназначена для использования в системах с ограниченными вычислительными ресурсами КТ, необходимо, чтобы она содержала минимально необходимое число параметров, но при этом удовлетворяла требованиям полноты и универсальности.

**Критерии оптимизации передачи электроэнергии в рамках МСПЭД.** При разработке методов и технологий доступа КТ к внешним источникам электроэнергии необходимо обеспечить оптимизацию маршрутов передачи по одному или нескольким критериям. Наиболее вероятные критерии оптимизации МСПЭД:

- поиск маршрута до наиболее «дешевого» источника электроэнергии, т.е. такого, стоимость доставки энергии от которого будет наименьшей (включая стоимость оплаты за транзит через промежуточные КТ);
- поиск маршрута до наиболее «надежного» источника электроэнергии, т.е. такого, вероятность отказа в электроснабжении которым, будет минимальной (включая отказ в предоставлении запрошенной мощности от источника в полном объеме, а так же отказ от любого из промежуточных КТ);
- поиск наиболее «короткого» маршрута до источника электроэнергии, т.е. такого, который включает наименьшее количество промежуточных КТ;
- поиск наиболее «быстрого» маршрута до источника электроэнергии, т.е. такого, энергия от которого будет доставлена до потребителя за минимальное время (этот критерий определяет продолжительность работы потребителя от запасенной электро-

энергии в собственном накопителе, в то время как идет поиск нового источника электроснабжения).

Нетрудно заметить, что приведённые возможные критерии оптимизации связаны с поиском оптимального маршрута передачи электроэнергии. Следовательно, задача оптимизации работы МСПЭД в большинстве случаев сводится к задаче поиска оптимального маршрута. В свою очередь, для того чтобы использовать алгоритмы поиска оптимального маршрута, необходимо иметь какое-либо формальное описание топологии системы передачи электроэнергии, т.е. её модель.

**Модель топологии системы передачи электроэнергии.** Задача поиска оптимального маршрута может быть решена после определения топологии системы. Предлагается один из способов формального описания топологии МСПЭД. Для определенности положим, что имеется система, включающая  $N$  клиентских терминалов и  $M$  каналов передачи.

Топологию МСПЭД, представленную в виде стандартной топологической схемы, можно однозначно описать «матрицей соединений»  $L$ , которая формируется по следующему правилу:

$$L[i,j] = \begin{cases} 1, & \text{если } КТ_j \text{ связан с } КП_i \\ 0, & \text{если связи } КТ_j \text{ с } КП_i \text{ нет} \end{cases} \quad i = 1 \dots M; \quad j = 1 \dots N$$

На рис. 3 в качестве примера представлена матрица соединений  $L$  для МСПЭД, показанной на рис. 2, построенная согласно приведённому правилу.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
C1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
C2	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
C3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1
C4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Рис. 3. Матрица соединений системы передачи электроэнергии и данных

Итак, цель построения матрицы соединений – формальное описание топологической схемы системы передачи электроэнергии,

без которой невозможна автоматизация поиска оптимального (согласно одному из критериев) маршрута передачи энергии по запросу КТ. Для осуществления самой процедуры поиска оптимального маршрута может быть использован один из известных алгоритмов, описанных, например, в [8].

Следует учитывать, что МСПЭД функционирует на основе инфраструктуры с меняющейся во времени топологией, т.е.  $L = L(t)$ . Поэтому при создании сегментов таких систем необходима установка серверов баз данных (8) рис.1, для централизованного обновления таблицы соединений при опросе КТ, либо внедрение в КТ алгоритмов автоматического формирования таблицы соединений на каждом из КТ.

**Модель клиентского терминала.** Помимо топологии системы передачи для поиска оптимального маршрута необходимо знать характеристики каждого клиентского терминала, через которые проходят потоки электроэнергии. Набор характеристик должен однозначно давать ответ на вопрос о возможности и экономической целесообразности поставки электроэнергии в канал передачи от данного КТ.

В результате рассмотрения требований к модели системы и критериев оптимизации выбраны следующие характеристики клиентского терминала:

- $P_{ji \max}$  – максимальная выходная мощность выхода  $j$  – го клиентского терминала, подключенного к  $i$  –му каналу передачи;
- $P_{ji}$  – текущая свободная мощность, которая может быть выдана по запросу системы  $j$  – ым клиентским терминалом в  $i$  – ый канал передачи;
- $C_j$  –стоимость, выдаваемой в канал передачи электрической мощности  $j$  – ым клиентским терминалом от собственного источника электроэнергии (изначально определяется централизованно как рекомендованная, но может быть изменена владельцем);
- $C_{ji}$  – стоимость электрической мощности, ретранслируемой  $j$  – ым клиентским терминалом в  $i$  – ый канал передачи при отборе энергии из другого канала передачи, подключенного к этому же клиентскому терминалу (изначально определяется централизованно как рекомендованная, но может быть изменена владельцем).

Таким образом, состояние клиентского терминала номер  $j$  в каждый момент времени описывается параметрами  $P_{ji \max}$ ,  $P_{ji}$ ,  $C_j$ ,

$C_{ji}$  . Совокупность параметров всех клиентских терминалов в МСПЭД образует *матрицу состояния терминалов*.

Параметры  $P_{ji \max}$  ,  $C_j$  ,  $C_{ji}$  можно считать константами для данного клиентского терминала, поскольку  $P_{j \max}$  будет изменяться лишь после замены/модернизации оборудования, а  $C_j$  и  $C_{ji}$  устанавливаются пользователем на длительный промежуток времени. Другими словами, все эти события происходят относительно редко.

В ходе автоматизированного вычисления оптимального маршрута по одному или нескольким критериям, наибольшие трудности возникают при динамическом учете параметра  $P_{ji}$  , который меняется случайным образом, в зависимости, например, от мгновенных значений скорости ветра на месте установки ветрогенератора или изменения собственного электропотребления владельца источника электроэнергии. Следует также учитывать, что клиентский терминал не имеет возможности мгновенно прекратить поставку электроэнергии в канал передачи, например, если владелец оборудования включил дополнительный электроприбор в своем доме и внутреннее потребление превысило объемы внутренней генерации на протяжении некоторого времени  $t$ . В этом случае, на период переходного процесса, дополнительное электропотребление домовладения покрывается из внутреннего накопителя электроэнергии, клиентский терминал посылает сообщение в биллинговую систему об отрицательном параметре  $P_{ji}$  и, получив разрешение, прекращает поставку электроэнергии в канал передачи. На следующем этапе, если параметр  $P_{ji}$  продолжает оставаться отрицательным, клиентский терминал проводит поиск маршрута до оптимального внешнего источника и, по завершению формирования составного канала, переходит в режим получения электроэнергии из системы в объеме имеющегося дефицита. Аналогичным образом строится алгоритм работы и клиентского терминала, находящегося в режиме потребления и получившего уведомление от биллинговой системы о невозможности дальнейшего получения энергии от текущего источника.

Для нахождения оптимального маршрута, серверное программное обеспечение взаиморасчетов (биллинговая система) должна иметь информацию о состоянии *всех* клиентских терминалов в системе и текущей матрицы соединений. Клиентский терминал отсылает уведомления биллинговой системе об изменении собственного состояния и имеет возможность, в случае необходимости, произвести подбор маршрута до источника, получая необходимые данные по запросу. Необходимо учитывать, что количество

возможных маршрутов доставки электроэнергии прогрессивно растет при подключении новых КС, а стоимость электроэнергии для потребителя существенно зависит от количества промежуточных сегментов на маршруте от источника до потребителя. В этих условиях разумно ограничить множество возможных маршрутов лишь теми, что предполагают использование не более двух согенераторов на пути от источника до потребителя.

**Структура вычислительного процесса клиентского терминала.** На основе построенных моделей топологии МСПЭД и клиентского терминала может быть предложена структура вычислительного процесса, который реализует алгоритмы оптимизации маршрутов доступа до источников согласно выработанным критериям (рис. 4).

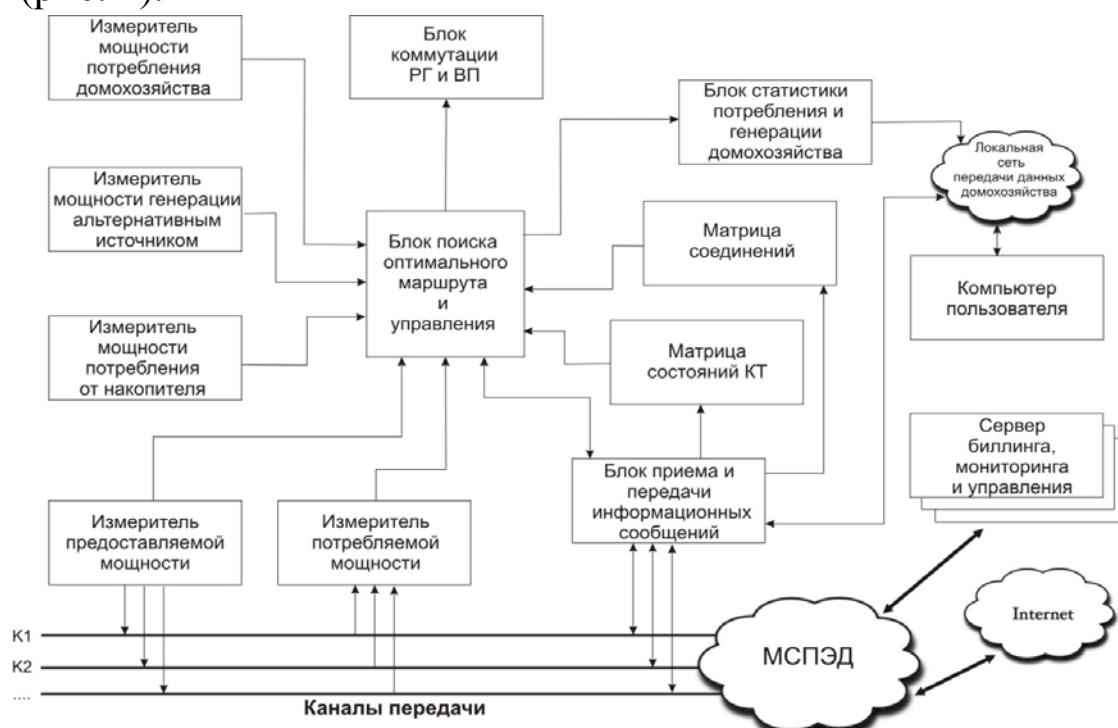


Рис. 4. Структурная схема вычислительного процесса клиентского терминала. Показаны основные блоки вычислительного процесса и потоки данных между ними.

Рассмотрим функции блоков вычислительного процесса.

**Блок измерителей мощности** реализует программный интерфейс взаимодействия с аппаратными датчиками измерения мгновенной мощности оборудования генерации и потребления, обслуживаемого клиентским терминалом. Данные накапливаются в оперативной памяти блока измерителей, усредняются на коротких временных интервалах и передаются в блок управления.

**Блок поиска оптимального маршрута и управления** обеспечивает управление потоками энергии, принимаемой и транслируемой в каналы передачи, непосредственно подключенные к КТ. Также задачей данного блока является обеспечение информационного взаимодействия с другими КТ, подключенными к МСПЭД. Поиск маршрута до оптимального с точки зрения выбранных критериев источника энергии происходит в случае недостатка во внутренней генерации на основании матрицы состояний КТ и матрицы соединений. Маршрут вычисляется как функция от текущего состояния множества клиентских терминалов  $T_1(t) \dots T_N(t)$ , текущей матрицы соединений  $L(t)$  и критерия оптимизации  $R$ , определяемого пользователем при конфигурации собственного клиентского терминала:

$$P = f(T_1(t) \dots T_N(t), L(t), R).$$

**Блок коммутации РГ и ВП** формирует управляющие сигналы для подключения резонансного генератора к каналу передачи в случае наличия невостребованной домохозяйством мощности внутренней генерации, либо подключения выпрямителя-приемника для получения дополнительной электрической мощности из МСПЭД. При подключении клиентского терминала одновременно к нескольким каналам передачи, блок коммутации управляет более чем одним комплектом РГ и ВП, организуя возможность регенерации электрической мощности из энергоизбыточного канала передачи в энергодефицитный. Команды на проведение коммутаций формируются блоком поиска оптимального маршрута и управления на основании баланса собственного энергопотребления и по запросам других КТ, строящих маршруты до источников.

**Блок приема и передачи информационных сообщений** осуществляет прием и передачу запросов и подтверждений при подключении к внешнему КТ и промежуточным согенераторам на основании построенного маршрута, осуществляет информационное взаимодействие с серверами биллинга, мониторинга и управления МСПЭД с получением и поддержкой в актуальном состоянии матриц соединений и состояний КТ, обновляет по команде блока управления состояние собственного КТ в базе данных МСПЭД. Дополнительными задачами блока является осуществление функций маршрутизации информационных пакетов при подключении КТ к нескольким каналам передачи, а также организация доступа из локальной компьютерной сети домохозяйства в Интернет, к сервисам телефонии, телевидения и др.

**Блок статистики потребления и генерации домохозяйства** производит накопление и долговременное хранение данных - текущих параметров генерации и потребления, получаемых от блока поиска оптимального маршрута и управления, обеспечивает представление накопленных данных пользователю в удобной для него форме. Блок также отвечает за хранение и предоставление по запросам данных – стоимости генерируемой мощности, стоимости мощности транзита, критерий оптимизации, которые устанавливаются пользователем как параметры предоставления собственных ресурсов КТ.

**Компьютер пользователя** является устройством управления и мониторинга владельца оборудования генерации и КТ.

**Сервера биллинга, мониторинга и управления** предназначены для обобщения собираемых по запросам от КТ параметров, построения и предоставления матриц соединений и матриц состояний КТ, ведения коммерческого учета поставляемой и потребляемой электроэнергии, сбора обобщенной статистической информации о работе МСПЭД, поддержки сайта мониторинговой и биллинговой информации в интересах пользователей.

Подобная организация вычислительного процесса имеет следующие достоинства:

- *универсальность*, т.е. вычислительный процесс, построенный по такой схеме, пригоден в подавляющем большинстве вариантов построения инфраструктуры МСПЭД;
- *адаптивность*. Структура вычислительного процесса спроектирована с учетом универсальной модели топологии системы передачи электроэнергии и модели клиентского терминала. Поскольку в своей работе вычислительный процесс клиентского терминала учитывает текущее состояние системы передачи энергии (её топологию и параметры клиентских терминалов), он в большинстве случаев способен сформировать маршрут до источника энергии, оптимального по установленному критерию оптимизации, адаптируясь к реальным условиям функционирования системы в данный момент времени.

### **Заключение:**

Интеграция генераторов и приемников электрической энергии в единое информационное пространство открывает возможности по организации непрерывного и *дифференцированного учета выданной и потребленной электроэнергии*. Возможность формирования рынка электроэнергии на муниципальном и районном уровне, с учетом реального спроса и предложения в различное время суток, требует разработки специализированных алгоритмов взаимодействия множества оборудования КТ с целью оптимизации наиболее



важных критериев работы системы.

На основании практических соображений выбраны критерии оптимизации передачи электроэнергии, которые послужили основой для формирования требований к топологической модели системы передачи электроэнергии и данных и модели клиентского терминала.

В результате рассмотрения построенной модели сделан вывод, что оптимальный маршрут является функцией от текущего состояния множества клиентских терминалов  $T_1(t) \dots T_N(t)$ , текущей матрицы соединений  $L(t)$  и критерия оптимизации  $R$ , определяемого пользователем при конфигурации собственного клиентского терминала. Также предложена одна из возможных структур вычислительного процесса клиентского терминала, который адаптируется к текущим условиям функционирования системы с использованием разработанных моделей топологии и КТ.

### ***Список литературы***

1. Джек Ньюшлосс, Игорь Ряпин. Развитие распределенной генерации. // Энергетический центр Московской школы управления Сколково. Август 2012.

2. Крюков Ю.А. Интеллектуальная распределительная сеть передачи электроэнергии и данных как технология, обеспечивающая прорывные изменения электроэнергетике и связи. // Русский инженер, - №2 (33), 2012, с. 57-61.

3. Кузнецов О.Л., Большаков Б.Е. Устойчивое развитие: Научные основы проектирования в системе природа-общество-человек.- Спб.-М.-Дубна, 2002.

4. Большаков Б.Е. Закон природы или как работает Пространство-Время. Российская академия естественных наук, Дубна, 2002.

5. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи электрической энергии. // Российская академия сельскохозяйственных наук, Москва, 2006.

6. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, Сайт Министерства энергетики Российской Федерации, <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/>

7. Шамин А.А. Организация вычислительного процесса микропроцессорных терминалов для многоканальных систем передачи данных. Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Вычислительные технологии, Том 12, Специальный выпуск 1, 2007.

8. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Энергоатомиздат, 1987.

**Патрикеев Л.Н.**  
**АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**  
*Национальный исследовательский ядерный университет*  
*«МИФИ»*  
[lnp70@mail.ru](mailto:lnp70@mail.ru)

В работе рассматриваются три взаимосвязанные проблемы :

- **экономический мир**, в котором мы живём,
- **технологии нанoeлектроники**, которыми уже владеем,
- **перспективы** альтернативной или **нетрадиционной энергетики**, к которой относятся все энергетические системы с возобновляемыми источниками энергии (**ВИЭ**).

**1. Мир, в котором мы живём**

В мире развернулся процесс глобализации, который подразумевает свободный поток *людей, капиталов, товаров, технологий, информации* и глобальную конкуренцию. С нашим холодным климатом связана высокая стоимость капитального строительства и большая энергоёмкость отечественной продукции. Поэтому большинство товаров и продуктов, производимых у нас, никогда не будут конкурентоспособны. Стратегически правильно выходить на мировой рынок с товарами, которые не умеют делать в других странах (а не только с невозполнимыми природными ресурсами).

В соответствии с теорией Н.Д. Кондратьева (4.03.1892-17.09.1938) **кризисы, войны и революции** определяются, прежде всего, сменой **технологических укладов**. Анализируя экономическую конъюнктуру развитых стран, великий русский экономист Николай Дмитриевич Кондратьев в первой четверти XX века выдвинул теорию больших волн и смены технологических укладов. Его подход позднее был подхвачен немецким экономистом М. Шумпертом (1883-1950), а в конце XX века блестяще развит и дополнен в работах отечественных академиков Д.С. Львова и С.Ю. Глазьева (до недавнего времени возглавлявшего кафедру экономики НИЯУ МИФИ).

На Рис.1 наглядно показана инфра траектории развития различных макротехнологий, описанных Н.Д. Кондратьевым. 4-й технологический уклад, показанный на этом рисунке, был блестяще подготовлен и реализован в годы индустриализации СССР и дал России шанс не только выиграть ВОВ, но и реализовать два величайших экономических проекта – Атомный и Космический.



Рис.1 Инфратраектории технологических укладов Кондратьева.

Пятый технологический уклад, связанный с телекоммуникациями, микроэлектроникой, малотоннажной химией Россией, по существу, и к сожалению, был «пропущен». Этот вывод хорошо виден из Таблицы 1, составленной С.Ю. Глазьевым, где отмечены возможности и ограничения технико-экономического развития России в условиях структурных изменений в мировой экономике и в ходе динамики технологических укладов.

Таблица 1

Характеристики уклада	Номер технологического уклада				
	I	II	III	IV	V
Период доминирования	1770-1830	1830-1880	1880-1930	1930-1970	1970-2010
Технологические лидеры	Великобритания Франция, Бельгия.	Великобритания, Франция, Бельгия, Германия, США.	Германия, США, Великобритания, Франция, Бельгия, Швейцария, Нидерланды	США, Западная Европа, Япония.	США, Япония.
Развитые страны	Германские государства, Нидерланды	Италия, Нидерланды, Швейцария, Австро-Венгрия	Италия, Дания, Австро-Венгрия, Канада, Япония, Испания, Россия, Швеция	СССР, Новые индустриальные страны (НИС)	НИС, Бразилия, Россия
Ядро технологического уклада	Текстильная промышленность, текстильное машиностроение, выплавка чугуна, обработка железа, строительство каналов, водяной двигатель	Паровой двигатель, железнодорожное строительство, транспорт, машино и пароходостроение, угольная пром. и станкоинструмент, чёрная металлургия	Электро-техническое и тяжёлое машиностроение, производство и прокат стали, линии электропередач, неорганическая химия	Автомобилестроение, цветная металлургия, производство товаров длительного пользования, синтетические материалы, органическая химия, производство и переработка нефти и нефтехимии	Электронная промышленность, Вычислительная, оптоволоконная техника, программное обеспечение, телекоммуникации, роботостроение, производство и переработка газа, информационные услуги
Ключевой фактор	Текстильные машины	Паровой двигатель	Электро-двигатель, сталь	Двигатель внутреннего сгорания	Микро-электронные компоненты
Формирующееся ядро нового уклада	Паровые двигатели машиностроение	Сталь, электроэнергетика, тяжёлое машиностроение, неорганическая химия.	Автомобилестроение, Органическая химия, переработка нефти, цветная металлургия, автодорожное строительство	Радары, строительство трубопроводов, авиационная промышленность, производство и переработка газа	Нанотехнологии. Молекулярная биология
Преимущества Данного технологического уклада по сравнению с предшествующим	Механизация и концентрация производства на фабриках	Рост масштабов и концентрации производства на основе парового двигателя	Повышение гибкости производства с использованием электро-двигателя стандартизация производства, урбанизация	Массовое и серийное производство	Индивидуализация производства и потребления, повышение гибкости производства. Преодоление экологических ограничений по энерго- и материалопотреблению, на основе КАЛС технологий



Рис.2. Ключевые факторы смены технологических укладов.

На Рис 2. в явном виде показаны доминирующие факторы, определившие смену технологий и особенно сильно повлиявшие на экономику развивавшихся стран.

В основе капитализма лежит стратегия создания и приумножения капитала. В прежние времена (инерционно и до настоящего времени) создание капитала было делом ориентированным на будущее, на передачу созданного своей семье, своему клану, своей компании или фирме. При этом классические курсы экономики всегда советовали вовлекать в хозяйственную деятельность весь объём доступных ресурсов.

Однако с развитием информационных технологий на смену прежним капиталистическим догмам всё настойчивее приходит новая парадигма поведения капиталиста или предпринимателя. Мы часто оглядываемся назад и не замечаем тех острых проблем, которые настойчиво стучатся в наши двери. Из статьи в статью кочуют слова о *постиндустриальном обществе*, в котором велика роль секторов услуг и *производства знаний*, по сравнению с *промышленностью и сельским хозяйством*.

Посмотрим на США – страну наиболее близкую к постиндустриальной модели. Двое из каждой сотни работающих кормят всё общество, примерно 10 заняты в производстве. Примерно 13 управляют жизнью общества. Для чего нужны оставшиеся 75?!

Предыдущая, капиталистическая траектория, по которой развивалось человечество, в наши дни всё активнее теряет устойчивость. **Капитализм кончается!** Начинается новый, постиндустриальный экономический уклад, который условно можно назвать «экономикой знаний».

Сейчас каждый год добывается больше энергоносителей, чем природа создала за целый миллион лет. Человечеству предстоит пережить один из самых крутых поворотов в своей истории. Здесь можно надеяться только на **науку**, на **новые технологии**, на более высокий уровень ответственности всего мирового сообщества.

Важнейшие экономические структуры, складывавшиеся веками, перестают работать. К августу 2011 года американская экономика – крупнейшая в мире – превысила лимит государственного долга в 14,3 трлн. долларов и оказалась на грани банкротства. Мировой валовой продукт сейчас оценивается примерно в 60 трлн. долларов, где доля США составляет 18%, а объём совокупной денежной массы оценивается в 1200 трлн. долларов. Другими словами 95 % обращающихся в мире денег не имеют никакого обеспечения.

Период исторического безвременья заканчивается. Пора решать и действовать. Нужно ясное видение *будущего*, необходимо наметить и стремиться воплотить *далёкие* впечатляющие *цели*, позволяющие строить стратегии и намечать планы. Нужны единомышленники и специалисты.

В мире, к счастью, есть примеры такого трезвого подхода к оценкам перспектив развития. Одним из примеров в этом плане является Сингапур. С 1963 года в этой небольшой стране был взят курс на модернизацию экономики на основе **5 технологического уклада**, конкретно на основе форсированного развития электроники. За 50 лет экономика Сингапура выросла примерно в **300 раз** – с *700 млн.* долларов валового внутреннего продукта (ВВП) до более *200 млрд.* долларов США. При населении в 5 миллионов человек ВВП страны составляет примерно 1/10 ВВП России, а ежегодные темпы роста составили в Сингапуре в 2010 году **14,5%! (** За 30 лет ВВП Китая увеличился в 14 раз! – это то же пример).

Экспертные оценки показывают, что в 2014-2018 гг. страны-лидеры будут активно осваивать шестой уклад. Основу шестого технологического уклада, видимо, составят наноэнергетика, молекулярные, клеточные и ядерные технологии, нанотехнологии,

нанобио технологии, нанобионика, микроэлектронные технологии на основе *эксафлонных* элементов, наноматериалы, наноробототехника и другие наноразмерные производства. Реальной перспективой является возможность излечения хронических болезней через управление развитием живого организма на уровне генной структуры и стволовых клеток. Это путь к существенному возрастанию продолжительности активной жизни человека.

Под воздействием нанотехнологий кардинальным образом изменятся не только производства и производственные отношения, но и вся структура и роль *социальных* механизмов жизни общества.

В настоящее время экологи ввели контрольный показатель, называемый «Экологический след», показывающий каковы ресурсы, необходимые для поддержания используемых технологий. Леса Земли поглощают углекислый газ и выделяют кислород, пастбища позволяют выращивать скот, моря дают возможность вылавливать рыбу, Земля – выращивать сельскохозяйственные культуры и осуществлять застройку... Экологический след выражается в «глобальных гектарах» и может быть рассчитан для любой страны.

Если просуммировать эти показатели по всем странам, то выяснится, что в 1970-х годах человечество стало потреблять доступные нам ресурсы быстрее, чем природа может их производить. В настоящее время мы используем ресурсы в 1,5 раза быстрее, чем они возобновляются. То есть сейчас нам *уже* нужно **1,5 Земли!** По прогнозам, в 2030 году человечеству понадобится 2 Земли. (Если бы весь мир потреблял так, как США или Объединённые Арабские Эмираты, то уже сейчас нам понадобилось бы 4,5 Земли ).

Экологический след на душу населения превышает 10 гектаров в ОАЭ и Катар, 7- в Эстонии, 4 – в России, 2 – в Китае. Отсюда следует, что так жить *уже нельзя*, а скоро станет *невозможно*. И новые алгоритмы развития нашего мира либо будут найдены и приняты сознательно, либо будут складываться стихийно в кризисном, катастрофическом режиме.

Перед Всемирным экономическим форумом в Давосе было проведено исследование, посвящённое тенденциям развития и угрозам ближайшего десятилетия. По данным этого анализа, через десять лет население Земли должно увеличиться примерно на миллиард и достичь 7,7 млрд. человек. Нагрузка на биосферу, которая (как мы уже показали выше) уже превысила критическую, резко

возрастёт. К 2030 году спрос на еду вырастет на 50 %, на воду – на 30 %, на энергию – на 40 %.

Первые места в рейтинге рисков заняли *изменения климата, геополитические конфликты, рост цен на энергоносители и экономическое неравенство в мире*. Потенциальный ущерб от этих рисков в ближайшие 10 лет оценивается в 4,5 трлн. долларов.

Продвижение России в этом направлении связано с решением следующих первоочередных задач:

1. В короткий срок необходимо *освоить возможности*, представленные *ШЕСТЫМ технологическим* укладом.
2. Развитие *научно-технического* комплекса - как ключевого индикатора развития - ещё одна глобальная проблема технологического и инновационного комплекса страны.
3. Наконец, важным является установление *баланса* интересов между *обществом, наукой и бизнесом*.

Одно из главных событий в научной стратегии начала XXI века связано со сменой всех приоритетов! В самом деле, локомотивом современной прикладной науки, основой VI технологического уклада, до недавнего времени считалась четвёрка технологий (см. Рис .3). Это **нанотехнологии** (их символ и ключевой элемент – **атом**), **биотехнологии** (в их основе геномика и символ – **ген**), **информационные технологии** (**бит**), **когнитивные технологии** (символ – нервная клетка или нейрон, либо единица содержания – **мем**). Общепринятым стало сокращение NBIC (от Nano Bio Info Cognito ). Их взаимодействие можно представить в виде тетраэдра, над гранью которого Bio Info Cognito возвышается Nano. Именно нанотехнологии представлялись мотором происходящей научно – технической революции. Эти технологии, позволяющие манипулировать отдельными атомами и в перспективе дающие возможность строить структуры, не имеющие дефектов, «ошибок» на атомном уровне, казалось, откроют двери в сказку. Это и ключ к анализу генов и белков, и к созданию компьютеров огромной производительности, и к наблюдению (а в перспективе и к пониманию) динамики мозга.



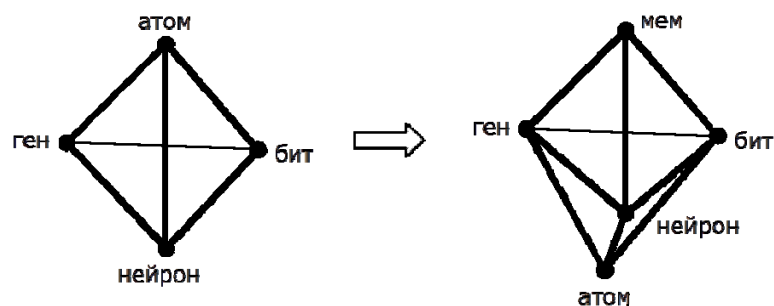


Рис.3. Традиционная связь NBIC - технологий и альтернативный вариант SCBIN, отражающий современные тенденции. В первом случае «локомотивом» технологического развития являются нанотехнологии, во втором – гуманитарные (*социальные, психологические, образовательные*).

Стремительное развитие всех этих технологий заставило скорректировать приоритеты. Сейчас уместнее говорить о другом сокращении **SCBIN** (Socio Cognito Bio Info Nano) и о решающей роли **социальных** технологий, без которых выдающиеся изобретения и научные достижения не будут восприняты и реализованы современным обществом, а может быть, и принесут ему большие беды.

## 2. Технологии нанoeлектроники, которыми мы уже владеем.

Из всего многообразия NBIC или SCBIN технологий в настоящем разделе мы отметим только технологии современной **нанoeлектроники**, на основе которых в следующем разделе будут рассмотрены проблемы альтернативной энергетики.

Прежде всего, отметим выдающиеся работы, когда то нашего соотечественника, а ныне академика Академии Наук Беларуси **Владимира Архиповича Лабунова** (Рис. 4).



Рис.4. В.А. Лабунов демонстрирует первый в мире технологический комплекс (кластер) по замкнутому, непрерывному производству *интегральных микросхем*.

В 2009 году на заседании Учёного Совета БГУИР, посвящённого празднованию 70-летия В.А. Лабунова, участниками заседания было горячо поддержано моё предложение выдвинуть профессора на присуждение ему Нобелевской премии: к тому времени кластерные технологические комплексы уже широко вошли в практику не только *микро*, но и *наноэлектронного* производства. (Бюрократическая машина выдвижения и международной поддержки этого предложения продолжает свою круговерть...).

В России одним из активных продолжателей идей и предложений белорусского Левши является Виктор Александрович Быков, создатель всемирно известной фирмы ***NT- MDT***.

Под научным руководством В.А. Быкова и при финансовой поддержке Министерств промышленности России и Белоруссии в настоящее время развернулась огромная работа по созданию технологий и оборудования наноэлектроники для мелкосерийных и среднесерийных производств элементной базы специального назначения с использованием систем ***безмасковой*** литографии с проектными нормами ***32 – 8 нм***.

На Рис.5 показана эволюция наноэлектронного производства фирмы ***Intel*** (Intel Technology Roadmap), на которую ориентируются создатели отечественного комплекса.

Process Name	P1266	P1268	P1270	P1272	P1274
<b>Litography</b>	45nm	32nm	<b>22nm</b>	<b>14nm</b>	<b>10nm</b>
<b>1-St Production</b>	2007	2009	<b>2011</b>	<b>2013</b>	<b>2015</b>

Рис.5. Дорожная карта литографического прогресса, реализуемая фирмой Интел.

Научно-техническая база разрабатываемого технологического кластера создана фирмой ***НТ-МДТ*** и уже в нескольких отечественных организациях апробирована на базе изготовления отдельных логических элементов – от полевых многозатворных ***p-*** и ***n-*** канальных транзисторов до логических элементов и новых (например, мемристорных) элементов. В отечественной практике такой кластер называется ***НАНОФАБ – 100***. Цифра в названии говорит о том, что размеры пластины для экспериментов ограничены в этом комплексе 100 мм.

В качестве встроенного в комплекс литографического оборудования в НАНОФАБ – 100 используется либо ионная, либо сканирующая зондовая литография. Указанный комплекс, в частности установлен и эксплуатируется в Институте кристаллографии РАН, в Научном центре «Курчатовский институт», в Южном федеральном университете (Таганрог), в Научно-образовательном центре Тюменского госуниверситета, в ФГУП НИИИФП.

Результатом выполнения описываемого проекта будет радикальное повышение скорости разработок и рентабельности мелко-серийного производства интегральных схем и нанoeлектроники, в том числе, для оборонных отраслей промышленности.

**Ключевой** технологией нового кластера станет аппаратное обеспечение *многолучевой безмасковой литографии*, в состав оборудования которой войдут:

- \* *Многолучевая система экспонирования и совмещения электронной литографии;*

- \* *Модуль нанесения электронного резиста;*

- \* *Модули проявления, травления и снятия электронного резиста;*

- \* *Модули загрузки, складирования и подготовки пластин.*

Прототипы систем высокопроизводительной электронной литографии в мировой практике уже начинают проявляться. Примерами могут служить оригинальные образцы таких фирм как:

- IMS Nanofabrication AG (Viena , Austria);

- MULTIBEAM Corporation, Santa Clara, CA, USA  
<http://www.multibeamcorp.com>;

- CRESTEC Co., Tokyo, Japan;

- Mapper Litography.

Фирма IMS Nanofabrication AG разрабатывает систему для производства фотошаблонов с предельными нормами до 10нм и поэтому весьма интересна для возможного партнёрства при разработке нашего кластера. К сожалению, в установке этой фирмы используется ускоряющее напряжение величиной 50 кВ, что может привести к радиационным повреждениям в структурах в процессе экспонирования и сотрудничество с этой группой разработчиков практически становится не возможным.

Компания MULTIBEAM Co. ведёт разработку при поддержке фонда DARPA и только поэтому партнёрство с ней затруднено. Кроме того на сегодня у этой группы ещё нет готового проекта или опытного образца.

Наиболее интересными для тесного сотрудничества являются две последние из числа названных выше фирм – CRESTEC CO. и MAPPER Litography Co., Netherland.

Первая из этих фирм была образована в 1995 году и позиционируется как разработчик и производитель систем электронной литографии для секторов разработки и производств. В настоящее время в разработке технологов и конструкторов этой группы находится установка электронной литографии для безмасковых технологий CMPL – Maskless Litography. Эта фирма активно ищет партнёров по бизнесу в своём классе и открыто продемонстрировала В.А. Быкову свои впечатляющие текущие достижения. В установке CNPL ускоряющее напряжение может быть снижено с 30 до 5 кВ. Количество одновременно управляемых электронных лучей в машине этой группы доходит до 100, а диаметр обрабатываемых пластин равен 200 мм, что соответствует требованиям нашего проекта. Уже достигнуто разрешение в 24 нм и видны возможности довести разрешение до 10 нм. Важно отметить, что время экспонирования одной пластины диаметром 200 мм с предельным разрешением составляет 5 – 7 минут.

Фирма Mapper Litography образована в 2000 г., Delft, Netherlands. Пока она позиционируется как разработчик систем многолучевой электронной литографии для сектора серийных заводов. Компания имеет 17 международных патентов. Её первая экспериментальная установка имеет 110 лучевую систему и ещё в 2011 году была внедрена в компании TSMC. С момента образования эта компания живёт на инвестициях. В качестве инвесторов выступают Parcom (Parc – IT), KBC Private Equity, Quest for Growth, Rusnano, Hoving end Partners. Частными инвесторами являются Arthur del Prado, Fonder of ASM International N.V., а так же Delft University of Technology.

В настоящее время многолучевая система электронной литографии демонстрируется как конкурент оптической литографии для фабрик *массового* производства ЭКБ. Выход на рынок ожидается уже в текущем 2014 году. Производительность 10-модульного кластера оценивается в 100 процессов в час при диаметре пластин 300 мм. Разрешение против уже полученного (20 нм) составит 10 нм. Ценовая ниша такого комплекса составит 80 – 100 млн. Евро.

Приведенные выше описания опытных зарубежных безмасочных электронных литографий позволяют уточнить требования к отечественному комплексу:

*\* Время полномасштабного процесса экспонирования пластин диаметром 200 мм с разрешением до 14 нм, включая загрузку, совмещение и выгрузку пластин не должно превышать 15 минут;*

*\* Количество дефектов на пластине 200 мм не должно превышать 2;*

*\* Необходимо предусмотреть возможность использования литографического кластера в режиме производства фотошаблонов для фото и рентгенолитографических процессов;*

*\* Стоимость литографического кластера не должна превышать 500 млн. рублей (в ценах 2012 г.).*

Рынок кластеров описанной многолучевой электронной безмасковой литографии в комплексах предприятий, заинтересованных в мелкосерийном производстве отечественной ЭКБ может достигать до 100 комплектов, что совокупно составит 50 млрд. рублей.

Принцип работы такого кластера показан на Рис. 6. Приведенная картинка соответствует идеям и конструктивам, изобретённым специалистами фирмы Mapper Litography.

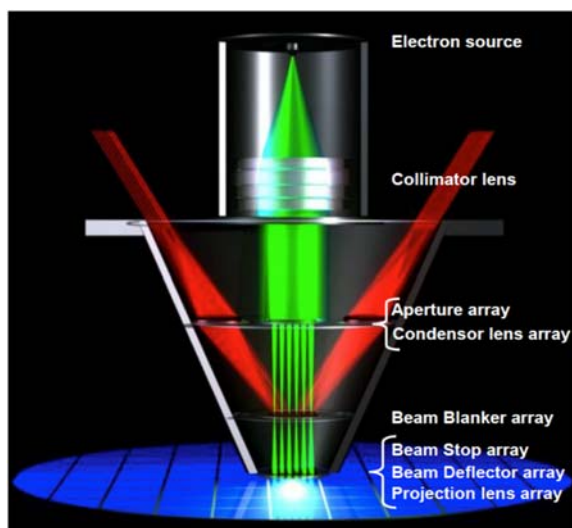


Рис. 6 . Принцип работы многолучевого, безмасочного литографа.

Достижения не только зарубежных, но и отечественных специалистов по МЭМС и НЭМС (например, в МИЭТ в Зеленограде или в СПб ЭТУ), а так же значительные успехи в создании многочисленных информационных и чрезвычайно сложных вычислительных систем, включая эксафлопные комплексы, позволяют с оп-

тимизмом рассматривать отечественный технологический кластер **НАНОФАБ – 200** как прорывной проект отечественной наноэлектронной технологии.

Итак, на базе каких уже *освоенных* технологических возможностей работает кластерный комплекс НАНОФАБ – 100. Если кратко, то эти возможности все представлены как единство следующих технологических процессов:

**1. Анализ поверхности.**

*Зондовая, ионная и электронномикроскопическая аппаратура и методики; ОЖЕ, ВИМС, ЭСХА + СИ, ФЭС, EXAFS, SAS.*

**2. Нанесение слоёв.**

*Лазерная абляция -  $V_2O_5$ ,  $ZnO$ ,  $LaBaCuO$ ,  $Pb(TiZr)O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CeO$ ,  $Y_2O_3$ ,  $AlN$ ,  $MgO$ .*

*Плазмохимическое нанесение -  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $poli\ Si$ .*

*Рост УНТ и графеновых слоёв.*

*Магнетронное напыление металлов.*

*Нанесение резиста – для ионной и электронной литографии и для оптической безмасковой литографии.*

*Формирование слоёв фото-стимулированным осаждением, включая жертвенные слои  $(GeXSiXO_2) + \{(GeYSi1-Y)_3N_4\}$ .*

**3. Плазмохимическое травление слоёв.**

*Очистка, утонение, травление через маску, удаление резиста и химико-механическая планаризация.*

**4. Локальное осаждение и травление. ФИП, ФЕП, СЗМ.**

*Осаждение  $W$ ,  $Mg$ ,  $Pt$ ,  $C$ ,  $Ni$ , травление фтором, формирование рисунка в маскирующем слое, формирование островков катализаторов для роста УНТ ( $Ni$ ,  $Fe$ ,  $Co$ ), формирование наноразмерных объёмных структур.*

**5. Безмасковая электронная литография.**

*Возможности создания наноструктур на пластинах диаметром 200 мм с разрешением 14 – 8 нм и временем экспонирования до 5 -10 пластин в час.*

Во время демонстрационной презентации магистрам будут продемонстрированы разработанные и выпускаемые фирмой НТ-МДТ многочисленные технологические установки, комплектование которых в кластерную линию высокой производительности возможно в самых взыскательных вариантах. В качестве примеров на страницах этой публикации приведём лишь некоторые отдельные установки.

Ожидаемый дизайн кластерных технологических линий мелко- и среднесерийного производства ЭКБ специального назначения уровня 32 – 8 нм

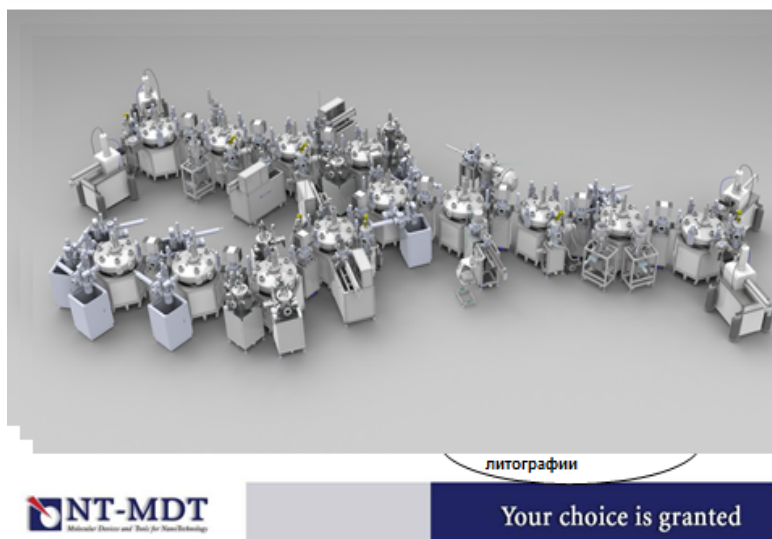


Рис. 7. Так выглядит макет замкнутого технологического кластера

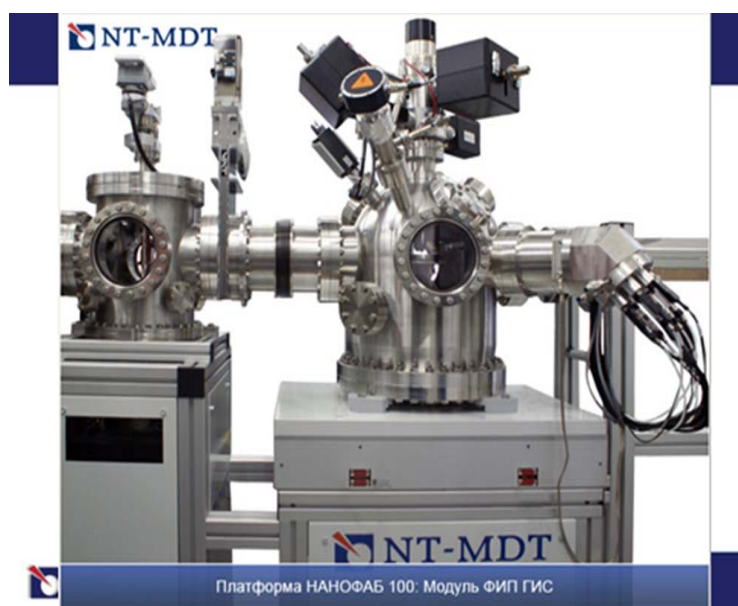


Рис. 8. Внешний вид реального модуля СТМ

### **Нанoeлектронные технологии, которыми мы владеем в НИЯУ МИФИ.**

В настоящее время в НИЯУ МИФИ по инициативе ректора М.Н.Стриханова и под научным руководством проф. Н.И. Каргина организован и первоклассно оснащён импортным оборудованием Научно – Образовательный Центр (НОЦ) «Нанoeлектроника». Основной цель этого НОЦ является разработка СВЧ приборов и



устройств на таких материалах как *GaN, InP, SiC, SiGe, GaAs* и на основе классических наногетероструктур.

Этап промышленной реализации приборов на указанных материалах в России затянулся. На сегодняшний день только планируются закупки необходимого заводом оборудования и отсутствуют необходимые кадры. По этой причине работы, проводимые в НОЦ МИФИ, очень высоко ценятся и контролируются заказчиками. Широко известно, что приборы СВЧ диапазона востребованы в системах беспроводной связи, радиолокации, в приёмопередающих модулях АФАР, сканерах систем безопасности в ТГц диапазоне, бытовых и *специальных* системах.

НОЦ НИЯУ МИФИ расположен в чистых комнатах площадью более 650 квадратных метров. В состав технологического оборудования НОЦ включены такие базовые технологические установки как:

- *Фотолитография с разрешением от 90 до 50 нм;*
- *Электроннолучевая литография с разрешением до единиц нм.*
- *Установки металлизации и плазменных процессов;*
- *Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии для синтеза наногетероструктур;*
- *Широкая номенклатура встроенного и дополнительного метрологического обеспечения.*

Единственным «недостатком» созданной технологической линейки является отсутствие роботизированного перегрузчика образцов от операции к операции. Однако в условиях обучения студентов и аспирантов этот недостаток превращается во вполне удовлетворительное *преимущество*. В руках студентов хрупкие и драгоценные пластины исходных материалов, при всей осторожности обращения с ними, порой ломаются. В таких случаях завершение создания структур приходится проводить не на пластинах, а на их кусочках.

Ниже, на нескольких фотографиях представлены обстановка и оборудование НОЦ «Наноэлектроника» НИЯУ МИФИ (Рис.9, Рис. 10 и Рис 11).





Рис.9. Комната химической подготовки образцов НОЦ МИФИ.



Рис. 10. Растровый электронный микроскоп.



Рис.11. Установка молекулярно - лучевой эпитаксии для разработки и выращивания гетероструктур.

### 3. Перспективы альтернативной или возобновляемой энергетики.

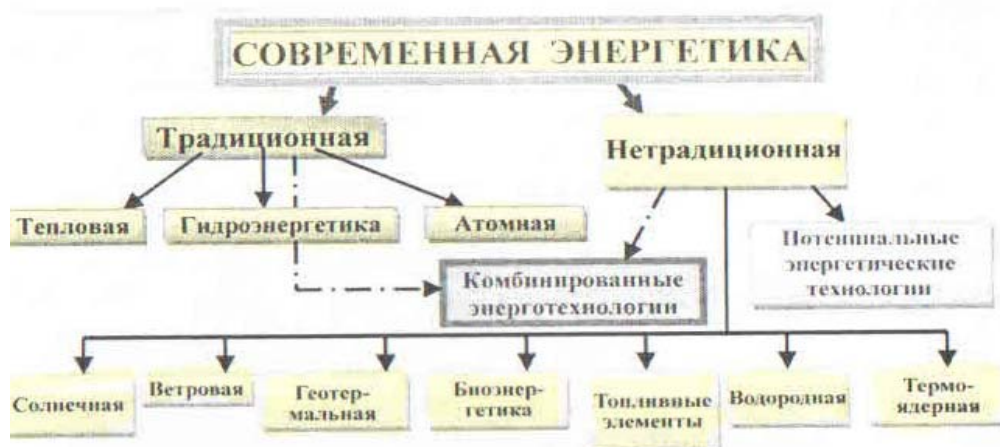


Рис.12. Структура современной мировой энергетики.

Как видно из Рис.12., современная мировая энергетика воплощает в себе две независимые ветви - **Традиционную** и **Нетрадиционну** (ТЭ и НЭ).

В настоящее время суммарное потребление энергии в мире равно примерно **14 ТВт**. При этом 80 - 82% этой энергии получают от **тепловых** источников с высокой долей эмиссии **CO<sub>2</sub>** (*нефть, уголь и природный газ*). К 2050г. глобальные потребности в энергии могут вырасти вдвое и составить 25-30 ТВт. (Критический для природы уровень концентрации **CO<sub>2</sub>** наступит, как оценивают экологи, уже при 20 ТВт ).

Основой современной **тепловой** энергетики являются тепловые электростанции (**ТЭС**), работающие на органическом топливе. ТЭС, использующие в качестве топлива ядерное горючее, выделяются в отдельную **атомную** группу – **АЭС**.

К числу преимуществ ТЭС можно отнести следующие :

- *Возможность строительства ТЭС практически в любом месте;*
  - *Стоимость 1 кВт мощности и срок строительства ТЭС меньше, чем АЭС;*
  - *Производство энергии не зависит от сезона , а только от доставки топлива.*
  - *Средняя цена 1 кВт.ч на тепловых (ТЭС) – 4 – 6 центов.*
- Однако:

- ТЭС – самые экологически **грязные**, т.к. КПД ТЭС не превышает 40%;

- В отличие от ГЭС они с трудом покрывают суточных перепады энергии.

Раздел энергетики, использующий энергию естественного движения водных масс рек или приливов, выделяется в традиционном комплексе в группу **гидроэнергетики**, основу которой составляют ГЭС и ПЭС (гидро- и приливные электростанции). Гидроэнергетика в мировом энергетическом балансе занимает только около 2 % (**0,3 ТВт**), а атомная около 7 % (**0,9 ТВт**). При этом цена гидроэлектроэнергии **3 – 4** , а атомной **6 - 7** центов за 1 кВт.ч .

Важной особенностью гидроэнергетики является её высокий КПД (**до 90 %**). КПД в атомной энергетике доходит до 60 % и более.

Сегодня в мире работают 441 АЭС. И все они, вместе взятые, вырабатывают около 7 % производимой в мире энергии. Установленная мощность АЭС в США составляет 90 млн. кВт, в России - более 22 млн. кВт (во Франции - 60, в Японии - 40). Доля АЭС в установленной мощности России составляет более 10 %, а в выработке электроэнергии – 16 %.

Важно подчеркнуть, что несмотря на аварии на Чернобыльской АЭС и на АЭС в Фукусиме, общественное мнение в отношении атомной энергии, явно пошатнувшееся из-за аварий, в последнее время заметно улучшилось. Это связывают с активными усилиями ядерных держав, направленными на решение проблемы захоронения ядерных отходов.

Источники энергии, отнесенные к **нетрадиционной (или возобновляемой)** энергетике) (Рис. 12) по своему потенциалу **многokратно ПРЕВЫШАЮТ** как нынешний, так и предполагаемый уровень мировых потребностей. Перейти к **возобновляемым источникам энергии** (ВИЭ) стремятся сейчас все развитые страны. Большинство из этих стран уже освоили до 90 % имеющегося у них гидропотенциала и сконцентрировались на развитии **ветровой и солнечной энергетики, приливных ГЭС** и ряде других новых источников энергии. Страны Евросоюза рассматривают возможность доведения доли ВИЭ до 20 % уже к 2020 г. На сегодня суммарная мощность всех ветроэлектростанций (ВЭС) в ЕС уже превышает **30 ГВт**, а фотоэлектрических станций – более **2 ГВт**. Базовые параметры ВИЭ представлена в Таблице 1. и Таблице.2.

Таблица 1. Классификация ВИЭ и технологии получения энергии

Вид энергии	Технология
Солнечная энергия	1) Прямое преобразование в электрическую энергию (фотоэлектричество); 2) преобразование в электроэнергию (термодинамический цикл) — электрические станции; 3) преобразование в тепловую энергию — солнечные коллекторы
Ветровая энергия	1) Производство электрической энергии — ветроэлектрические установки (ВЭУ); 2) производство механической энергии — водоподъемные ветроустановки
Энергия рек и водосмов	Производство электрической энергии — ГЭС большой и средней мощности; малые и микроГЭС
Геотермальная энергия	1) Производство электроэнергии — геотермальные электростанции (ГеоЭС); производство тепловой энергии — геотермальные тепловые станции, тепловые насосы; 2) прямое использование горячей воды
Приливная энергия	Производство электроэнергии — приливные электростанции (ПЭС)
Низкопотенциальное топливо	Производство тепловой энергии — тепловые насосы
Биомасса	1) Производство электрической и тепловой энергии — прямое сжигание биомассы (электростанции, котельные); 2) получение жидкого и газообразного топлива (биогазовые и газогенераторные установки, пиролиз и «быстрый» пиролиз); производство биоэтанола и биодизеля

Таблица 2. Рост производства энергии за счёт использования ВИЭ.

ВИЭ	2004 г.	2030 г.	Примерный рост (разы)
Производство электроэнергии, ТВт·ч, всего	3179	7775	> 2
в том числе:			
гидроэнергия	2810	4903	< 2
биомасса	227	983	> 4
ветроэнергетика	82	1440	18
солнечная энергетика	4	238	60
геотермальная энергетика	56	185	> 3
приливная и волновая энергетика	< 1	25	46
биотопливо	15	147	10
геотермальное тепло	4,4	25	6
солнечные тепловые установки	6,6	64	10

**Солнечная** энергия используется для получения *тепловой, электрической и комбинированных* видов энергии. Ресурсы солнечной энергии превышают мировое энергопотребление в 100000 раз. Они

существенно больше, чем ресурсы всех других видов возобновляемых источников энергии вместе взятых.

В 2013 г общая мировая мощность солнечной термальной энергетики превысила 1 ГВт. Именно солнечный нагрев воды является самым эффективным способом преобразования солнечной энергии, поскольку осуществляется с КПД в 60 – 90 %!

*Солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ)* находят всё более широкое применение как источник электроэнергии для средних и малых автономных потребителей. Однако всё чаще и чаще большие солнечные электростанции работают в энергосистемах параллельно с традиционными ТЭС, ГЭС и АЭС.

В промышленном производстве СФЭУ на **Si** имеют следующие КПД:

*\* монокристаллический - 15 – 18 % (и до 25 на опытных образцах),*

*\* поликристаллический – 12 – 14 % (и до 16 % на опытных образцах),*

*\* аморфный – 8 – 10 % (до 14 % в экспериментах).*

Приведенные значения соответствуют так называемым однослойным фотоэлементам. Сегодня исследуются двух - и трёхслойные фотопреобразователи, которые позволяют использовать большую часть солнечного спектра. Для таких двуслойных образцов получен КПД 30 %, а для трёхслойных 40 % и более .

На **GaAs** даже в однослойном элементе КПД превышает 30 %. Около 90 % рынка СФЭУ – кремниевые толстоплёночные элементы. Для активно продвигаемых на рынок тонкоплёночных элементов (в том числе и на органо - полупроводниковой основе) исследователи стремятся к КПД, равному 15 %. С применением технологии рулонного производства цена таких СФЭУ может быть снижена в 4 – 5 раз.

Для того, чтобы сделать производство солнечной энергии конкурентоспособным по сравнению с другими способами, стоимость производства панелей должна быть снижена до уровня 1 доллар за 1 ВТ установленной мощности или снижена цена производства ими энергии хотя бы до 1 долл./ кВт.ч .

Мировая фотоэнергетика стремительно развивается независимо от высокой стоимости, существенной зависимости от времени суток, перегрева, влияния пыли и ограниченного срока службы (до 30 лет). Мощность СФЭУ в мире с 2010 по 2013 годы возросла с 5,4

ГВт до 13 ГВт, что соответствует среднегодовому приросту свыше 35 %.

К 2050 году эта мощность по планам США, Китая и стран ЕС может вырасти в 1000 раз, достигнув уровня более **10 ТВт**! При этом оптимистические оценки предполагают снижение стоимости 1 кВт электрической мощности на солнечных установках до уровня **10** центов за 1 кВт, что вполне сопоставимо со стоимостью энергии от традиционных источников.

Запасы энергии **ветра** для приземного слоя толщиной 500 м примерно в 100 раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты. Использование хотя бы 10 % (что вполне реально и экономически оправдано) этой энергии будет равно количеству электроэнергии, вырабатываемой сегодня во всём мире.

Преобразование кинетической энергии ветра в электрическую происходит с помощью *ветроэнергетических установок (ВЭУ)*. Такие ВЭУ делят по мощности на малые (до 10 кВт); средние – от 10 до 100 кВт; крупные – от 100 до 1000 кВт и сверхкрупные – более 1 МВт.

Ветрогенераторы – мощные сооружения, которые устанавливаются на мачтах высотой 50 – 80 м (есть примеры и 150 м) с длиной лопастей при мощности 1 -2 МВт в пределах 25 – 40 м и весом до 50 т.

Концы лопастей крупной установки, двигаясь с большой скоростью, создают **шум** с уровнем 95 -100 дБ, что близко к болевому порогу человеческого уха (120 дБ). Поэтому ветроагрегаты большой мощности необходимо строить на значительных расстояниях от жилья (более 300 м). С мощными инфразвуковыми колебаниями, подавляющими развитие природы в зоне расположения ВЭУ, связан ещё один недостаток этих систем. Одним из решений этой проблемы является рекомендация строить ВЭУ на прибрежных морских платформах.

Ветроэнергетика Испании, где ежегодный прирост мощности ВЭУ составляет 2,5 ГВт, в один из дней 2008 г дала стране более 40 % всей необходимой энергии. Китай в 2011г. опередил Индию и занял в Азии лидирующее положение, введя в эксплуатацию ВЭУ мощностью более 50 ГВт и получив около 1,3 % суммарной выработки электроэнергии. Вслед за Китаем по темпу строительства ВЭУ идут США с годовым приростом в 10 ГВт. По данным статистического агентства GWEC Россия в 2008 г. заняла 51 место по



установленной ветро мощности с объёмом в 13,4 МВт. В электрическом балансе страны это составляет всего 0,01 %.

Идея использования **биотоплива** в качестве источника энергии имеет тысячелетнюю историю. Состав *свежей* биомассы обладает всеми характеристиками, присущими ископаемому топливу. Биомасса сегодня – четвёртое по значению топливо в мире. На её основе ежегодно получают около 15 % от всех первичных теплоносителей.

Поиск ВИЭ, которые смогли бы вытеснить ископаемые углеводороды, привёл к активным работам по производству этилового спирта. Спирт получают из кукурузы, сахарного тростника и других злаков и растений традиционным способом брожения и перегонки.

При добавлении 10 % спирта в бензин (топливо Е – 10) никаких модификаций двигателей автомобилей не требуется и эта добавка разрешена и рекомендована всеми автопроизводителями. Смесь бензина со спиртом даёт более экономичный расход топлива и меньший износ деталей. Кроме того на 30 % уменьшается эмиссия вредных веществ за счёт кислорода, имеющегося в составе этанола.

**Топливные элементы** (ТЭ) считаются эффективным и экологически чистым способом получения энергии. ТЭ – это электрохимические устройства, в которых осуществляется прямое преобразование химической энергии топлива (например у водорода) в электрическую энергию.

ТЭ (Рис.13) состоит из слоя *электролита* (ионного проводника), контактирующего с разных сторон конструкции с *пористым* анодом и катодом. На аноде водородосодержащее сырьё, например **чистый водород  $H_2$**  (или природный газ, аммиак, метанол или бензин) вступает в реакцию электроокисления

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$  с образованием свободных электронов, протекающих по внешней цепи на катод. На катоде происходит электрохимическое восстановление окислителя, в качестве которого выступает  $O_2$  или обычный воздух, или перекись водорода и т.д. Электрическая цепь замыкается переносом ионов в электролите от одного электрода к другому

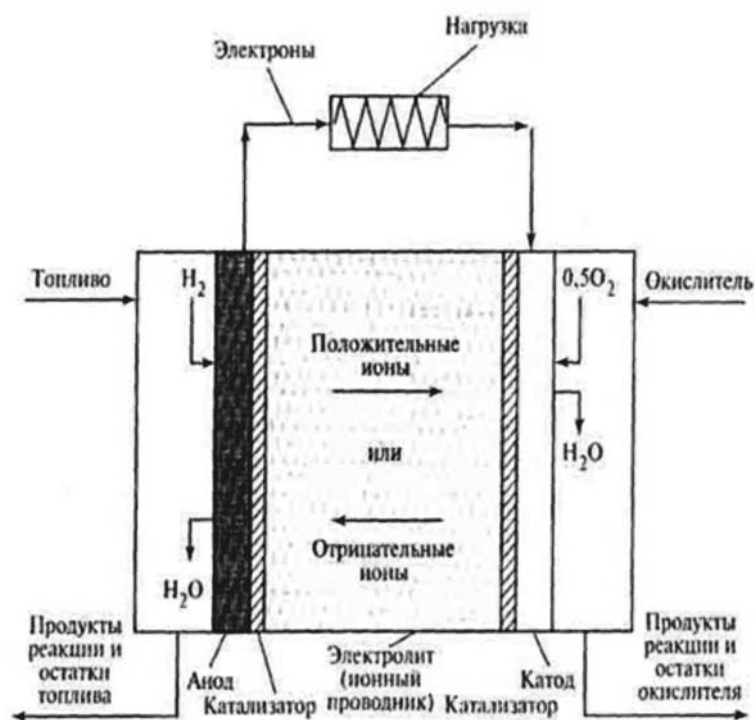


Рис.13. Схема кислородно – водородного топливного элемента.

КПД ТЭ уже сегодня выше 70 %, хотя теоретически ограничения на резкий рост КПД отсутствуют. Области применения топливных элементов в ближайшие годы хорошо определены (Таблица 3).

Таблица 3.

Область применения топливных элементов [6]

Область применения	Номинальная мощность	Пример использования
Стационарные установки	5—250 кВт и выше	Автономные источники тепло- и электроснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, источники бесперебойного питания, резервные и аварийные источники электроснабжения
Портативные установки	1—50 кВт	Дорожные указатели, грузовые и железнодорожные рефрижераторы, инвалидные коляски, тележки для гольфа, космические корабли и спутники
Мобильные установки	25—150 кВт	Автомобили (опытные образцы создали, например, DaimlerCrysler, FIAT, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Nissan, Toyota, Volkswagen, BA3), автобусы (например, MAN, Neoplan, Renault) и другие транспортные средства, военные корабли и субмарины
Микро-устройства	1—500 Вт	Мобильные телефоны, ноутбуки, карманные компьютеры (PDA), различные бытовые электронные устройства, современные военные приборы



Один из основных недостатков топливных элементов это их относительно высокая стоимость, которая с постоянным совершенствованием конструкции, естественно снижается. Не случайно многие авто и авиастроительные фирмы активно пытаются внедрить ТЭ.

**Водородная энергетика.** Водород в настоящее время в основном используется в технологических процессах производства бензина и производства аммиака. Одним из недостатков, сдерживающих развитие водородного транспорта, является отсутствие водородной инфраструктуры. Одна из Голландских компаний предоставила городу Сочи на время проведения Олимпиады резервуары для хранения водорода на АЗС, обеспечив перевод автотранспорта на экологически чистое топливо.

**Термоядерная энергетика.** В настоящее время действует экспериментальная программа, поддерживаемая совместными усилиями Европы, России, Японии и США, предусматривающая создание первого экспериментального ТОКАМАК-реактора, рассчитанного на достижение термоядерного горения смеси дейтерия с тритием. Учёные надеются к 2020-2025 году получить необходимые ядерно – физические константы, необходимые для строительства в 2030- 2035 годах первого демонстрационного реактора для производства электроэнергии.

На этом можно было бы завершить обзор проблем современной энергетики. Однако необходимо упомянуть о далеко ещё не раскрытых возможностях *заоблачной* и особенно *космической солнечной энергетики*. Развитие работ по разработке троса для космического лифта и дальнейшее освоение ближнего космоса и Луны приближают широчайшие возможности внедрения указанных проектов.

*Некоторые примеры применения нанотехнологий в энергетике.*

При строительстве плотин, морских причалов, корпусов АЭС и ТЭС, сейсмостойких, пожаро-безопасных и других конструкций отечественная фирма «Передовые наукоёмкие технологии» (научный руководитель А.Н. Пономарёв ) широко пропагандирует использование *нанобетона* на основе микроскопических добавок *астраленов*. *Астралены*, производимые фирмой, представляют собой одну из аллотропных модификаций углерода с размерами 50-150 нм. При добавлении астраленов в бетонную массу в количестве

от 0,001 до 0,01% (от массы цемента) прочностные характеристики получаемых нанобетонов резко повышаются (как минимум в 5 и более раз). В *ТГТУ* работы по нанобетону на основе астраленов и на основе широкой номенклатуры выращиваемого в лабораториях университета материала *ТАУНИТ* широко развиваются.

В Наноцентре МЭИ выпускником МИФИ С.С. Гавриным ( н. рук. проф Н.А. Яштулов) создан микромощный *топливный элемент*, получивший престижную международную премию «Глобальная энергетика. О продолжении этой работы можно узнать из статьи студентки *А.Б.Рудаковой*, опубликованной в сборнике докладов нашей школы.

Масштабные работы по повышению КПД органо – полупроводниковых *солнечных* преобразователей и *суперконденсаторов* малой и средней мощности проводятся (с нашим участием) в лабораториях БГУИР, в МИЭТе и в Ярославском госуниверситете. С присоединением к НИЯУ МИФИ Севастопольского Политеха, возможно удастся расширить фронт этих работ с переносом экспериментальных установок на бесплодные пока степи Крыма (см. статью студентки НИЯУ МИФИ Е.Н.Козиной). О роботизированных и энерговооружённых средствах *медицинского* или других специальных методов инвазивного *воздействия*, основанных на *биоисточниках* энергии в настоящем сборнике можно ознакомиться, прочитав заметку магистра второго года обучения из РУДН *К. Ranabhat*.

Небезынтересны результаты масштабных работ проф. А.Я. Хавкина из Национального исследовательского горного университета (Москва) по повышению с применением различных нанотехнологий *коэффициента извлечения* нефти и газа с 30 до 60 %. О некоторых таких решениях можно прочитать в статье магистранта РУДН *Д.В. Шмелёва*, опубликованной в сборнике материалов этой школы.

В разделе 2 мы подробно рассмотрели состояние современной технологии нанoeлектроники. Особый акцент (в связи со слабой информированностью соотечественников) был при этом сделан на *бес шаблонной* электронной литографии. В работе магистранта РУДН *М.С.Chitimbo* (см. Сборник статей) более подробно, чем мы могли себе позволить, рассказано о возможностях МЭМС, без овладения которыми успех многолучевой электронной литографии был бы невозможен.

### *Список литературы*

1. Малинецкий Г.Г. Ключи от будущего. –М.: Бином, 2014. - 304 с.
2. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. –М.: Мир, 2002. -292 с.
3. ЭКОНОФИЗИКА. Современная физика в поисках экономической теории. –М.: МИФИ, 2007.- 624 с.
3. Медоуз Дж. Азбука системного мышления. -М.: Бином, 2010. - 344 с.
4. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. –М.: Бином. 2005. - 135 с.
5. Эрлих Г.В. Малые объекты - Большие идеи. Широкий взгляд на нанотехнологии. -М.: Бином, 2011. –270с.
6. Головин Ю.И. Наномир без формул. –М.: Бином. 2012. -309 с.
7. Дмитриев А.С., Михайлова И.А. Введение в наноэнергетику. –Изд. дом МЭИ.: 2011. -320 с.
8. Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Грешилов П.А., Верлан А.А. Солнечные космические электростанции – пути развития. –М.: изд. МАИ- ПРИНТ. 2013. -160 с.

**Муромцев Д.Ю.**

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшее профессиональное образование*

*«Тамбовский государственный технический университет»*

[crems@crems.jesby.tstu.ru](mailto:crems@crems.jesby.tstu.ru)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-00489 А.

Широкий класс энергоемких промышленных аппаратов составляют разного рода печи и сушильные установки. Эти аппараты используются не только в химической промышленности, но и на предприятиях, производящих электронную и машиностроительную продукцию, строительные материалы, продукты питания и т.д. На предприятиях, использующих термическое оборудование, в связи с ростом цен на энергоносители затраты на электроэнергию и топливо становятся сопоставимыми с затратами на сырье. Снижение энергопотребления является важным фактором в решении проблемы конкурентоспособности как предприятий, так и товара.

### **1 Энергетическая эффективность**

Важнейшим условием конкурентоспособности энергопотребляемой продукции производственно-технического назначения и бытового потребления в настоящее время становится ее энергетическая эффективность. В соответствии со стандартами под эффективным использованием топливно-энергетических ресурсов (энергоносителей) понимается экономически оправданное их использование при существующем уровне развития техники и технологий, соблюдение требований к охране окружающей природной среды.

Традиционно снижение энергетических затрат на производстве в процессах нагрева достигается за счет: а) повышения производительности технологического оборудования, уменьшения его простоев в рабочем состоянии; б) повышения надежности электротермических аппаратов; в) улучшения теплоизоляции [1 – 3].

Важным резервом снижения энергопотребления является оптимальное управление динамическими режимами с учетом изменяющихся состояний функционирования. Теоретические исследования показывают, что при оптимальном управлении снижение энергозатрат в динамических режимах достигает 20% и более при

условии, что используются алгоритмы синтеза оптимального управления (ОУ) в реальном времени, реализуемые простыми и дешевыми микропроцессорными устройствами. Использование энергосберегающего управления наряду с экономией ресурсов повышает долговечность оборудования.

В общем случае энергосбережение достигается реализацией научных, технических, экономических, производственных, а также организационных и правовых мер, направленных на эффективное использование ТЭР. В качестве ТЭР рассматривается совокупность природных и производственных энергоносителей, запасенная энергия, которых доступна для использования в хозяйственной и других видах деятельности при существующем уровне развития техники и технологии. Энергоносителями могут быть вещество в различных агрегатных состояниях (газообразном, жидком, твердом) или другие формы материи (поле, плазма и т.д.), запасенная энергия которых может использоваться в целях энергосбережения.

В настоящее время выделяют три основные группы показателей энергетической эффективности (ПЭЭ): 1) нормируемые ПЭЭ продукции, вносимые в паспорта и другую нормативную документацию; 2) ПЭЭ производственных процессов, вносимые в энергопаспорта предприятий; 3) показатели реализации энергосбережения.

Для характеристики технической, научной, экономической деятельности по энергоэффективности рекомендуется использовать следующие ПЭЭ:

- физическая экономия ТЭР, в том числе за счет нормирования энергопотребления и экономического стимулирования;
- снижение потерь ТЭР за счет оптимизации режимных параметров, внедрения автоматических систем энергосберегающего управления, приборов учета ТЭР и подготовки кадров;
- снижение энергоемкости производства продукции за счет структурной перестройки энергопотребления, использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии, вторичных энергоресурсов, высокотехнологичного оборудования, отвечающего мировому уровню, и т.п.

## **2 Термические объекты как объекты энергосберегающего управления**

Значительного снижения энергозатрат можно добиться за счет использования систем энергосберегающего управления объектами

производственно-технического назначения. Опыт использования оптимального управления работой тепловых аппаратов показал, что экономия энергозатрат для технологических печей составляет 15-17%, для электрических нагревателей жидкости – до 20% . Также значительное снижение энергозатрат достигается при оптимальном управлении динамическими режимами машин с электроприводами и транспортными средствами.

Исследования по моделированию и оптимизации на ряде термических объектах (ТО), в том числе: вальце-ленточные сушилки, камерные сушилки; печи пиролиза; электрические прецизионные печи; водогрейные котлы; газовые котельные и др., показали, что как объекты управления это оборудование имеет следующие особенности.

1. Всем ТО в процессе функционирования присущи динамические режимы работы, когда скорости изменения фазовых координат  $z$  отличны от нуля. К таким режимам относятся пуск аппарата, переход на другой технологический регламент, устранение отклонений режимных параметров, вызываемых возмущающими воздействиями, и т.д.

2. Все реальные ТО характеризуются тепловыми потерями в окружающую среду и инерционностью. Для многих ТО наряду с процессами теплообмена характерны химические и массообменные процессы.

3. Динамические процессы в ТО могут быть с достаточной точностью описаны моделями в форме систем обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом для различных участков диапазона возможных значений фазовых координат в модели динамики могут изменяться размерность вектора  $z$ , вид и параметры дифференциальных уравнений, а также характер возмущающих воздействий.

4. Вектор управления  $u$  содержит компоненты, связанные с расходом (затратами) энергоносителей.

5. При постановке задач оптимального управления (ЗОУ) в качестве минимизируемых функционалов обычно используются показатели, характеризующие точность выполнения технологического регламента (для обеспечения качества продукции), энергетические (затраты энергии, расход топлива), показатели производительности (быстродействие), а также комбинации этих функционалов.

6. В зависимости от условий функционирования ТО (характер возмущающих воздействий, частота смены режимов работы, требования к точности поддержания регламента и др.) возможны

различные стратегии реализации ОУ: программная, позиционная (с обратной связью), корректируемые программная и позиционная, гарантированного управления, с оптимальной фильтрацией и др.

7. Для всех ТО в ЗОУ имеют место жесткие ограничения на векторы управления и фазовые координаты. Так, на компоненты вектора  $u$  накладываются ограничения в каждый момент времени, интегральные, на допустимую скорость изменения управляющих воздействий и др.

С учетом рассмотренных особенностей может быть записана кортежная модель ЗОУ в виде четверки

$$\langle M, F, S, O \rangle$$

где  $M$  – вид модели динамики ТО;  $F$  – вид минимизируемого функционала;  $S$  – стратегия реализации ОУ;  $O$  – ограничения, накладываемые на  $u$  и  $z$ .

Тепловые аппараты классифицируются по разным признакам. Для решения задач энергосберегающего управления, в которых первостепенное значение имеют задания минимизируемого функционала и выбор стратегии управления, важную роль играет классификация объектов по виду используемого энергоносителя и особенностям режимов работы.

Основные классы тепловых объектов, различающиеся видом энергоносителя и соответственно минимизируемого функционала  $F$ , представлены на рис. 1. Из приведенной схемы видно, что большое число тепловых объектов используют один вид энергоносителя. Например, в электрических печах сопротивления, электроводонагревателях, сушилках и др. аппаратах используется электронагрев и в качестве функционала здесь обычно рассматривается минимум затрат энергии ( $I_{\text{э}}$ ). Широкий класс тепловых объектов в качестве теплоагентов используют пар, высокоорганические теплоносители, а также продукты сжигания жидкого или газообразного топлива. К таким объектам относятся теплообменники, бойлеры, печи для нагрева жидких продуктов, выпарные установки, сушилки и т.п., в качестве функционала берется расход «топлива» ( $I_{\text{т}}$ ).

Наряду с рассмотренными объектами, для которых минимизируются или только затраты энергии, или только расход топлива, назовем их монообъектами, в последнее время начинают получать распространение, так называемые, гибридные объекты. В задачах энергосберегающего управления гибридными объектами исполь-

зуются комбинированные функционалы в виде взвешенной суммы затрат энергии и расхода топлива или различных видов топлива. К таким объектам относятся водогрейные котлы, отопительные и нагревательные системы, модульные котельные и др.

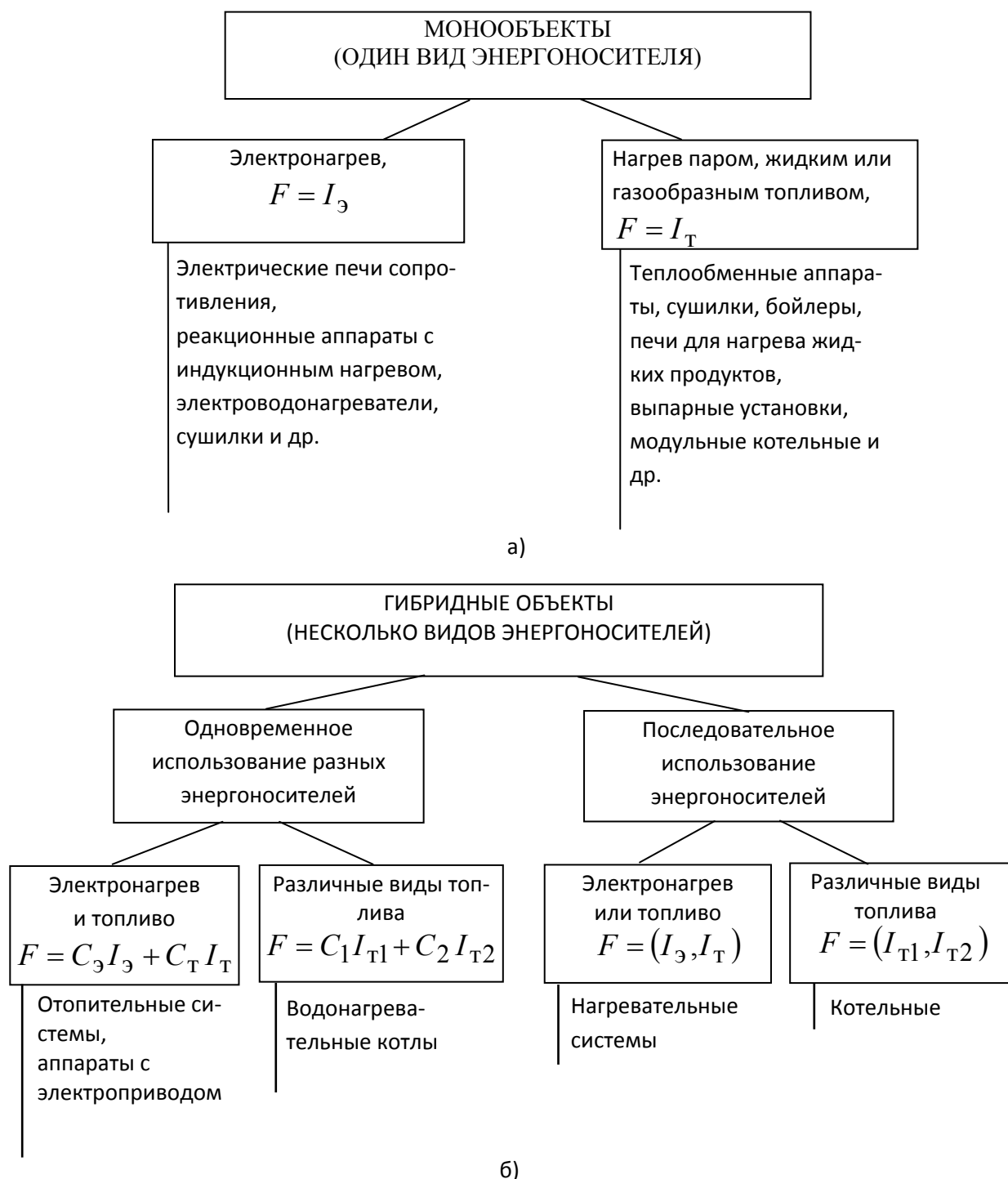


Рис. 1 Классификация тепловых объектов по видам минимизируемых функционалов в задачах энергосбережения ( $I_{\text{э}}$  - затраты энергии,  $I_{\text{т}}$  - расход топлива,  $C_i$  - весовые коэффициенты): монообъекты (а), гибридные объекты (б)



Здесь следует выделить два типа гибридных объектов (см. рис.1) – объекты, в которых одновременно могут использоваться различные энергоносители, и объекты, в которых используемые энергоносители только чередуются во времени. К гибридным объектам близко примыкают тепловые аппараты с электроприводом.

На рис.2 представлена классификация тепловых аппаратов, различающихся режимами работы, степенью теплоизоляции от внешней среды, а также наличием возмущающих воздействий. Эти факторы имеют большое значение при выборе стратегии  $S$  реализации ОУ, а также позволяют сделать предположения о возможном эффекте от оптимизации динамических режимов. Так для объектов периодического действия (сушильные шкафы, бойлеры, выпарные аппараты, автоклавы) целесообразно использовать программные стратегии  $S_{пр}$ , а для объектов непрерывного действия (печи, барабанные сушилки, ректификационные установки) необходимо сочетать системы автоматического регулирования (АР) при малых изменениях регулируемой величины с оптимальным управлением при значительных возмущениях.

Наибольший эффект от энергосберегающего управления следует ожидать для объектов периодического действия со слабой теплоизоляцией. Как показывают эксперименты, снижение значения функционала здесь может достигать от 15% до 30% по сравнению с традиционным нагревом.

Многие тепловые объекты приходится рассматривать на множестве состояний функционирования. Это, прежде всего, многоцелевые аппараты, в которых происходят изменения фазового состава, структурные переходы и т.п. Для этих объектов приходится вводить модели, отражающие все состояния функционирования. Особый класс объектов управления составляют тепловые аппараты с распределенными параметрами, например, многозонные электрические печи, сушилки, ректификационные колонны и др.

По результатам краткого рассмотрения особенностей тепловых аппаратов применительно к задачам управления можно выделить кластер объектов, для которого наиболее целесообразно применение энергосберегающего управления. К этому кластеру относятся: 1) объекты, у которых время пребывания в динамических режимах составляет существенную часть общего времени работы (не менее 5%); 2) объекты, динамические режимы которых могут быть описаны системой обыкновенных дифференциальных уравнений, а также

дифференциальных уравнений с разрывной правой частью; 3) объекты с управляемыми тепловыми процессами, т.е. для которых можно реализовывать рассчитанные управляющие воздействия.

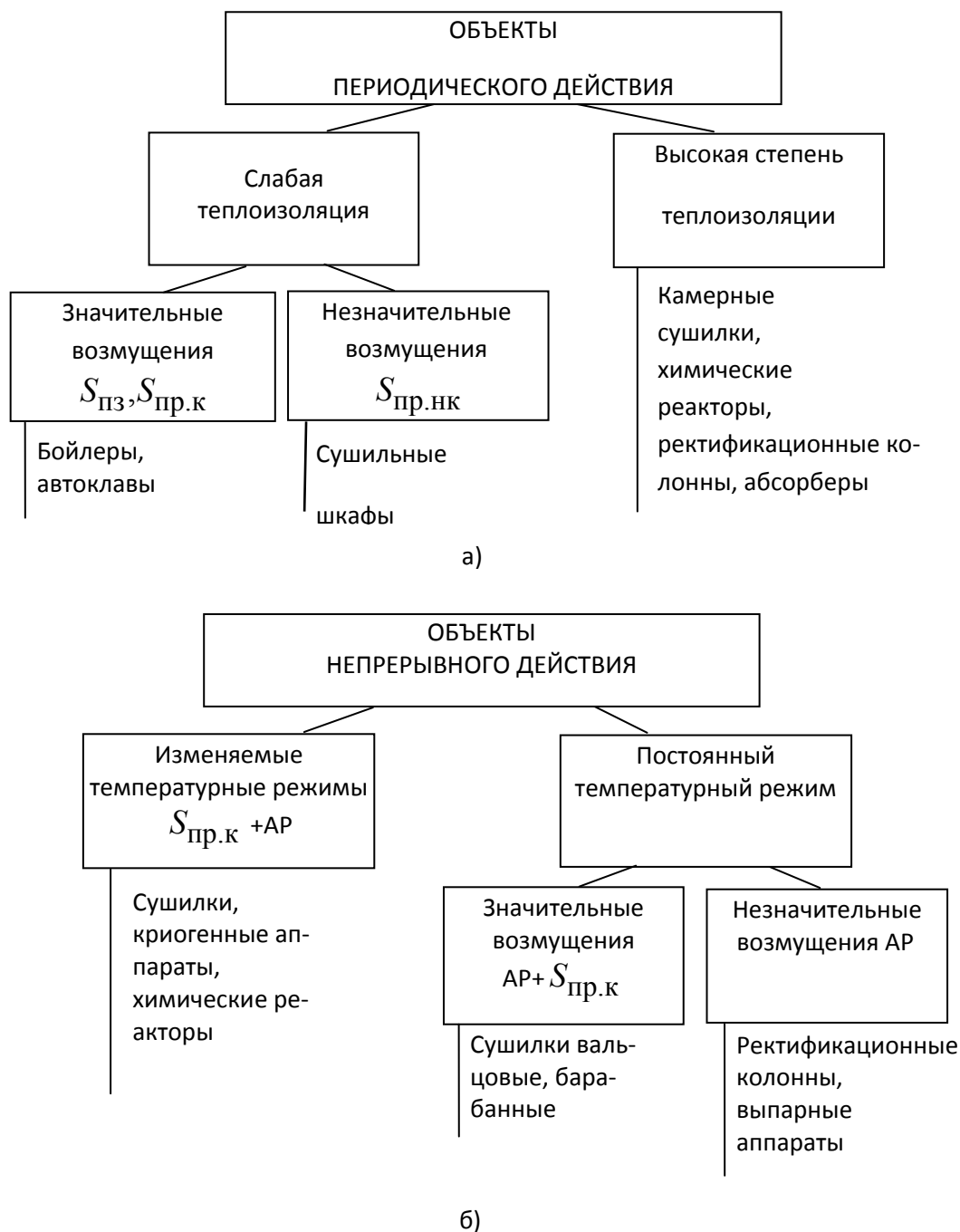


Рис. 2. Классификация тепловых объектов по режимам работы, определяющим стратегии реализации ОУ ( $S_{\text{пр.к}}$ ,  $S_{\text{пр.нк}}$  – программные стратегии корректируемая и некорректируемая соответственно,  $S_{\text{ПЗ}}$  – позиционная стратегия, АР – автоматический регулятор): объекты периодического действия (а) и объекты непрерывного действия (б)

Следует отметить, что в настоящее время практически отсутствуют тепловые аппараты с бортовыми контроллерами, которые в реальном времени решают задачи синтеза энергосберегающего управления динамическими режимами.

### 3. Анализ и синтез энергосберегающего управления

Важным резервом снижения энергопотребления является оптимальное управление динамическими режимами с учетом изменяющихся состояний функционирования. Теоретические исследования показывают, что при оптимальном управлении снижение энергозатрат в динамических режимах достигает 20% и более при условии, что используются алгоритмы синтеза оптимального управления (ОУ) в реальном времени, реализуемые простыми и дешевыми микропроцессорными устройствами. Использование энергосберегающего управления наряду с экономией ресурсов повышает долговечность оборудования.

В большинстве случаев разработка алгоритмического обеспечения для систем оптимального управления, минимизирующих затраты энергии, расход топлива и других ресурсов, представляет собой сложное научно-техническое исследование. В каталогах алгоритмического и программного обеспечения фирм, поставляющих программные и технические средства для промышленной автоматизации (КРУГ, Техноконт, Трейс Моуд, Matlab, Siemens, Schneider Electric, Omron и др.), отсутствуют сведения об алгоритмах, минимизирующих затраты энергии или расход топлива.

В существующих SCADA-системах и других программных средствах, используемых для проектирования систем автоматического управления и регулирования, предполагается стандартный набор алгоритмов: ПИ- и ПИД-регулирование, линейный квадратичный оптимальный регулятор, оптимальное быстродействие, нечеткий регулятор и некоторые другие, в которых не учитываются характерные для энергосберегающего управления ограничения, например, на лимит энергии или запас топлива. Ряд фирм в проспектах о своей продукции упоминают об энергосбережении и «мягком» пуске электродвигателей, однако используемые для этого алгоритмы не раскрываются и считаются ноу-хау фирмы.

Это объясняется следующим.

Во-первых, анализ задач оптимального управления (ЗОУ) с функционалом затраты энергии показывает, что даже в случае использования простейших моделей динамики в виде линейных дифференциальных уравнений третьего порядка при скалярном управ-

лении число возможных видов функций оптимального управления (ОУ) более двадцати. Если объект, динамика которого описывается дифференциальным уравнением второго порядка, имеет два входа (простейшая ММО-система), то число видов функций ОУ более сорока. Поэтому уже определение вида функции ОУ для задаваемого массива исходных данных представляет сложную задачу, такие задачи для многих энергоемких объектов еще теоретически не исследовались.

Во-вторых, в процессе реальной эксплуатации объекта происходят изменения режимов работы, требуемых значений выходных переменных, ограничений на переменные и т.п. Это требует оперативного пересчета управления, т.е. определения вида функции ОУ и ее параметров для новых исходных данных. Для такого пересчета ОУ в реальном времени необходима предварительно созданная база знаний.

В-третьих, для проектирования систем энергосберегающего управления часто приходится решать обратные задачи, например, определить при каких исходных данных решение ЗОУ существует, как надо изменить исходные данные, чтобы обеспечить требуемый запас практической устойчивости системы и т.п.

Под полным анализом ЗОУ понимается комплекс исследований, включающий: получение условий существования решения ЗОУ для любых задаваемых исходных данных; определение всех возможных видов функций ОУ (два вида функций  $u_i^*(t), u_j^*(t)$  считаются различными, если они содержат разное число параметров или параметры функций рассчитываются с помощью разных соотношений); разработку алгоритма определения вида функции ОУ для задаваемого массива исходных данных; получение соотношений для расчета параметров всех возможных функций ОУ; получение формул для расчета траекторий изменения фазовых координат для всех видов функций ОУ, а также оценки значения функционала; получение соотношений для решения обратных задач (например, насколько надо изменить время  $t_k$ , чтобы решение задачи существовало) [4].

В качестве математического аппарата для выполнения полного анализа ЗОУ используется принцип максимума и метод синтезирующих переменных [5]. Применение метода синтезирующих переменных (МСП) позволяет визуализировать ход и результаты решения как прямых, так и обратных задач управления. В основе МСП лежит идея сокращения размерности массива исходных дан-

ных за счет нормирования интервалов  $[t_0, t_k], [u_n, u_b]$  и введения вектора синтезирующих переменных  $L$ , однозначно характеризующего вид и параметры функции ОУ. Переход от массива исходных данных  $R$ , размерность которого всегда больше  $2n+5$ , к вектору  $L$  размерности  $n$  значительно облегчает и ускоряет обработку информации в вычислительных процессах при анализе и синтезе ОУ (здесь  $n$  – размерность вектора фазовых координат  $z$ ).

В процессе реальной эксплуатации объектов могут существенно изменяться компоненты модели ЗОУ  $\langle M, F, S, O \rangle$ , например, вид модели динамики, вид функционала или стратегии, такие изменения будем называть изменениями состояний функционирования. Если при изменении значений массива  $R$  модель ЗОУ сохраняется, то пересчет управления происходит с использованием соотношений, полученных при полном анализе одной ЗОУ. В случае изменения компонентов «четверки»  $\langle M, F, S, O \rangle$  для расчета нового ОУ требуется переход к результатам полного анализа другой ЗОУ. Если на этапе разработки СЭУ выявлены все возможные ситуации при эксплуатации объекта и соответствующие модели ЗОУ, а также выполнен полный анализ для этих задач, то будем говорить, что выполнен анализ ЗОУ на множестве состояний функционирования (МСФ) [4]. Элементами этого множества, обозначим его  $\mathcal{H}$ , являются значения переменной состояния функционирования  $h$ . Конкретному значению  $h$  соответствует определенная модель ЗОУ в виде четверки. Изменения  $h$  в процессе эксплуатации системы могут переходить как в определенные, так и в случайные моменты времени.

Основные трудности, встречающиеся при решении задач энергосберегающего управления, заключаются в следующем.

Во-первых, вид функции энергосберегающего управления (ЭУ) динамическим режимом объекта зависит от большого числа факторов. К этим факторам прежде всего относятся вид и значения параметров модели динамики объекта, вид минимизируемого функционала (затраты энергии, расход топлива и др.), значения исходных данных задачи управления (границы изменения управления, начальное и конечное значения вектора фазовых координат и т.д.). Для большинства реальных объектов, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями второго и третьего порядков, число различных функций ЭУ составляет несколько десятков. Заметим, что два вида ЭУ считается различными, если расчет

их параметров не может производиться с помощью одной вычислительной процедуры. Вследствие большого числа разных видов функций ЭУ применительно к одной задаче управления возникает проблема оперативного определения вида функции для задаваемого массива исходных данных.

Во-вторых, расчет параметров функции ЭУ как правило связан с решением системы сложных нелинейных уравнений. Эти системы уравнений для многих объектов пока еще не получены.

В-третьих, в процессе реализации рассчитанного ЭУ часто происходят непредвиденные изменения данных или условий задачи, связанных, например, с изменением модели динамики объекта, конечного значения вектора фазовых координат и т.п. В этом случае контроллер должен оперативно пересчитать ЭУ, т.е. определить новый вид функции и ее параметры.

В-четвертых, в задачах энергосберегающего управления часто содержатся специфические ограничения на управления и вектор фазовых координат. К таким ограничениям относятся интегральные ограничения на лимит энергии (запас топлива), скорость изменения управляющего воздействия, траектории изменения компонентов вектора фазовых координат и др.

В-пятых, многие энергопотребляемые объекты имеют нелинейные динамические характеристики. Теория энергосберегающего управления такими нелинейными объектами пока только начинает разрабатываться.

Перечисленные трудности носят общий характер для всех задач энергосберегающего управления. Кроме того, для каждого класса объектов (гибридные, многомерные) имеются свои особенности, осложняющие решение задачи.

#### **4 Экспертная система**

**«Энергосберегающее управление динамическими объектами»**

Фреймы экспертной системы содержат полную информацию о результатах полного анализа ЗОУ [6].

Разработанная экспертная система позволяет оперативно решать следующие задачи синтеза энергосберегающего управления.

1. Синтез алгоритмического обеспечения контроллера с использованием результатов полного анализа модели ЗОУ. Например, применительно к модели  $\langle M, F, Pr, O \rangle$  эта задача может формулироваться следующим образом.

Задаются диапазоны возможных изменений параметров модели объекта  $[a_{iH}, a_{iB}], [b_H, b_B]$ , границ управляющих воздействий  $[u'_H, u''_H], [u'_B, u''_B]$  временного интервала  $[t'_0, t''_0], [t'_K, t''_K]$  и концов траектории вектора фазовых координат  $[z'_{i0}, z''_{i0}], [z'_{iK}, z''_{iK}]$ . Требуется найти подмножество видов функций ОУ для указанных интервальных значений исходных данных, выделить соотношения для расчета параметров функций  $u_i^*(t)$ , проверки существования решения ЗОУ и решения обратных задач управления. По существу это задача разработки супервизора для интеллектуального контроллера.

2. Синтез ОУ в реальном времени (СРВ). Данная задача заключается в синтезе энергосберегающих управляющих воздействий при изменении состояний функционирования, т.е. решения ЗОУЗ на основе результатов анализа на МСФ. Математически задача СРВ формулируется следующим образом. Задается допустимое время  $\Delta t_d$ , которое удовлетворяет условиям: 1) вероятность изменения  $h$  за  $\Delta t_d$  пренебрежимо мала; 2) функционирование СЭУ в течение  $\Delta t_d$  при нескорректированном после изменения  $h$  управлении  $u(t)$  не ведет к срыву терминального условия  $z(t_K) = z^K$  за исключением случая, когда изменение  $h$  происходит в момент  $\theta = t_K - \Delta t_d$ ; 3) время  $\Delta t_d$  должно быть достаточно для идентификации значения  $h$ ; 4) время  $\Delta t_d$  соответствует возможностям микропроцессора по быстродействию. Иногда, например, при имеющемся контроллере, могут задаваться также объем памяти и пакет микрокоманд микропроцессорного устройства.

Требуется разработать алгоритм, который при произвольных изменениях  $h$  на интервале  $[t_0, t_K]$  (но таких, что при каждом значении  $h$  решение ЗОУ существует) за время  $\Delta t_c = \Delta t_d - \Delta t$  позволяет определить вид и рассчитать параметры управления  $u^*(\cdot/h)$ , соответствующего новому значению переменной  $h$ , и может быть реализован при заданных технических характеристиках управляющего устройства, здесь  $\Delta t$  – время, необходимое для расчета и установки скорректированного  $u(\cdot/h)$ .

3. Синтез гарантированного управления. Даная задача связана с синтезом управления в ЗОУ второго и четвертого классов, когда требуется получить управление, гарантирующее выполнение усло-

вия для конечного момента времени  $t_k$  при неизвестном состоянии функционирования на интервале управления  $[t_0, t_k]$ . Здесь различают два случая: в первом значение  $z(t_k)$  задается точкой  $z^k$  в  $n$ -мерном пространстве, во втором - областью  $Z^k$ .

4. Совмещенный синтез ОУ. В данной задаче задаются возможные виды модели объекта и массив исходных данных  $R$ , за исключением параметров объекта. Требуется за допустимое время идентифицировать модель объекта и затем определить вид и параметры функции ОУ.

5. Синтез квазиоптимального управления (КОУ). Данная задача часто связана с невозможностью плавно изменять ОУ по требуемому закону или со сложностью расчетов точного значения функции  $u^*(t)$ . В качестве вида КОУ  $\tilde{u}(t)$  обычно рассматривается ступенчатая функция, которая с требуемой точностью или допустимым увеличением функционала аппроксимирует непрерывную функцию  $u^*(t)$ . Применение КОУ позволяет значительно упростить реализацию управляющих воздействий за счет небольшого числа фиксированных значений  $u(t)$ . Например, для электронагрева используются два нагревательных элемента, в этом случае  $u(t)$  может принимать три значения 0 (оба элемента выключены),  $u_1$  (один элемент включен) и  $u_2$  (два элемента включены). Число значений  $\tilde{u}(t)$  может увеличиваться как за счет введения дополнительных элементов, так и за счет разных способов их включения (последовательное, параллельное, комбинированное).

## 5 Факторы эффекта энергосбережения

Эффект энергосбережения при использовании оптимального управления достигается за счет следующих факторов:

- реализация оптимальных траекторий изменения фазовых координат на всем временном интервале управления, например, для тепловых объектов оптимальная траектория изменения температуры обеспечивает сокращение временного участка с наибольшими потерями тепла в окружающую среду;
- оптимальное ведение динамических режимов при всех состояниях функционирования, т.е. в случае изменения модели динамики объекта или условий (исходных данных) задачи управления оперативно (в реальном времени) находится новое решение, и реа-



лизуются энергосберегающие управляющие воздействия для существующей ситуации;

- достижение задаваемого конечного значения вектора фазовых координат точно в требуемый момент времени, которое, в свою очередь, выбирается оптимальным;

- использование оптимальной стратегии реализации энергосберегающего управления (программной, позиционной или другой) для каждого состояния функционирования;

- замена обычных автоматических регуляторов энергосберегающими, которые устраняют значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения с минимумом затрат энергии (расхода топлива);

- использование резервов своевременного отключения энергоносителей (например, за остаточного тепла разогретого аппарата);

- создание локальных и бортовых систем энергосберегающего управления на базе простых и дешевых микропроцессорных устройств.

### **Выводы**

Краткое рассмотрение вопросов энергосберегающего управления ТО позволяет выделить некоторые перспективные направления для дальнейших научных исследований.

1. Совместное проектирование ТО и СЭУ с целью упрощения алгоритмического обеспечения (отодвинуть от границы областей видов ОУ).

2. Разработка специализированных МСх на основе использования КгМ, содержащих результаты полного анализа ЗОУ. Это позволит сократить время решения задач синтеза ОУ и удешевить СЭУ.

3. Создание «интеллектуальных» программных продуктов для автоматического вывода соотношений, используемых при полном анализе ЗОУ.

4. Разработка интеллектуальных контроллеров, которые в зависимости от сложившейся ситуации решают задачи выбора наилучшей стратегии реализации ОУ, вида минимизируемого функционала, изменяют условия исходной ЗОУ, если для них решение задачи не существует.

5. Использование виртуальных датчиков и комплексирования для оценки значений переменных, которые недоступны непосредственному измерению.

Для создания систем энергосберегающего управления требуется решить комплекс теоретических задач, основными из них являются:

- полный анализ задач оптимального управления для типовых моделей динамики энергоемких объектов, различных видов минимизируемых функционалов и стратегий реализации управляющих воздействий, ограничений на управления и фазовые координаты, встречающиеся в реальных условиях;
- анализ энергосберегающего управления машинами и аппаратами на множестве состояний функционирования, когда возможны изменения моделей объектов стратегий и функционалов;
- анализ энергосберегающего управления многомерными объектами;
- идентификация моделей динамических режимов, в том числе нелинейных и с временным запаздыванием по каналу управления, пригодных для использования в системах энергосберегающего управления.

### ***Список литературы:***

1. Аджиев, М. Э. Энергосберегающие технологии / М.Э. Аджиев. – М. : Знание, 1990. – 64 с.
2. Аракелов, В.Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / В.Е. Аракелов, А.И. Кремер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 188 с.
3. Ятров, С.Н. Энергосберегающие технологии в СССР и за рубежом. Аналитический альбом / С.Н. Ятров. – М.: Машиностроение, 1991. – 288 с.
4. Муромцев, Ю.Л. Теоретические основы энергосберегающего управления: монография / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин. – М.: ЯНУС – К, 2010. – 288 с.
5. Муромцев, Д.Ю. Синтез многофункциональных управляющих устройств / Д.Ю. Муромцев, В.В. Папин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т.19. № 2. – С.262 – 270.
6. Муромцев Д.Ю. Концепция экспертной системы с непрерывно развивающейся базой знаний / Муромцев Д.Ю., Муромцев Ю.Л., Грибков А.Н. // Вестник Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института). №3(7). 2008. С.30-37.

**Фокин В.М.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКЛОПАКЕТОВ  
ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ**

*ФГБОУ ВПО Волгоградский государственный архитектурно-  
строительный университет  
fokinvm@mail.ru*

*Приведены исследования энергоэффективности и теплофизических свойств стеклопакетов ограждений зданий. Рассмотрено влияние применения разного количества стёкол на теплофизические свойства стеклопакета. Приведены графики распределения коэффициента теплопроводности стеклопакета и термического сопротивления теплопроводности стеклопакета от средней температуры стеклопакета, а также распределение плотности теплового потока от разности температур стеклопакета.*

*Приведены исследования однокамерного и двухкамерного стеклопакета с теплозащитным покрытием: плёнкой (Бронза), напылением и без покрытия. Рассмотрено влияние применения теплозащитной плёнки на теплофизические свойства стеклопакета. Приведены сравнения коэффициента теплопроводности, термического сопротивления теплопроводности и плотности теплового потока однокамерного и двухкамерного стеклопакета, в том числе с теплозащитными плёнками.*

Наибольшие потери теплоты через ограждения зданий проходят через оконные стеклопакеты ограждений зданий. Для решения проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду от наружных ограждений зданий: оконных стеклопакетов, нужно знать теплопроводность  $\lambda$ , термическое сопротивление теплопроводности  $R$ , плотность теплового потока  $q$  [1]. Существуют различные виды стеклопакетов: однокамерные, двухкамерные, а также с возможным различным напылением и покрытием теплозащитной плёнкой. И чтобы выяснить через какой стеклопакет проходят меньшие тепловые потери необходимо знать теплофизические свойства стеклопакета.

Для исследования теплофизических свойств стеклопакетов ограждений зданий, были изготовлены однокамерные и двухкамер-

ные стеклопакеты с покрытием стёкол плёнкой и без покрытия. Размеры стеклопакетов:

однокамерный стеклопакет без плёнки  $250 \times 250 \times 24$  мм (4–16–4) мм, (рис. 1);

однокамерный стеклопакет  $250 \times 250 \times 24$  мм с плёнкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4) мм, (рис. 2);

однокамерный стеклопакет  $250 \times 250 \times 24$  мм с плёнкой (Бронза) на одном стекле (4Бронза–16–4) мм, (рис. 3);

двухкамерный стеклопакет без плёнки  $250 \times 250 \times 32$  мм (4–10–4–10–4) мм, (рис. 4);

двухкамерный стеклопакет  $250 \times 250 \times 32$  мм с расположением плёнок на двух крайних стёклах (4И–10–4–10–И4) мм, (рис. 5);

двухкамерный стеклопакет  $250 \times 250 \times 32$  мм с расположением плёнок на среднем и крайнем стёклах (4–10–4И–10–И4) мм, (рис. 6).

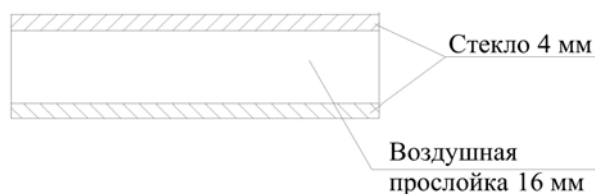


Рис. 1. Схема однокамерного стеклопакета (4–16–4)

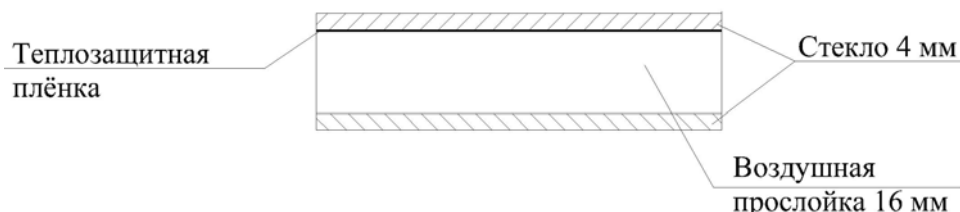


Рис. 2. Схема однокамерного стеклопакета с расположением плёнки на крайнем стекле (4И–16–4)

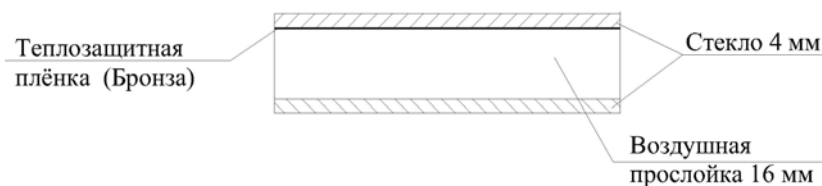


Рис. 3. Схема однокамерного стеклопакета с расположением плёнки (Бронза) на крайнем стекле (4И–16–4)

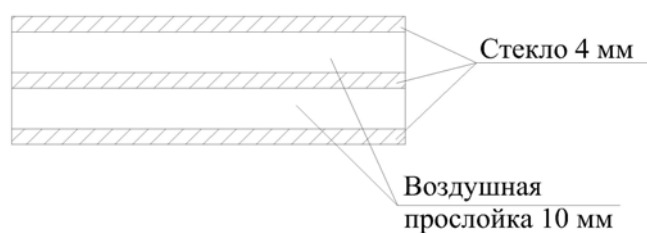


Рис. 4. Схема двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4)



Рис. 5. Схема двухкамерного стеклопакета с расположением плёнок на двух крайних стёклах (4И–10–4–10–И4)

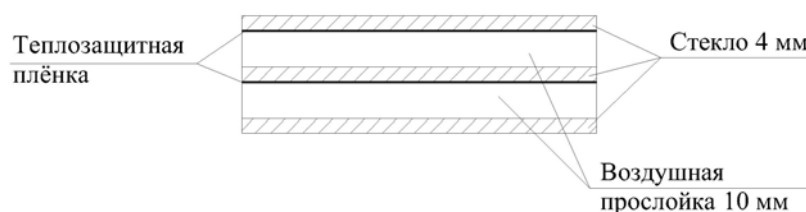


Рис. 6. Схема двухкамерного стеклопакета с расположением плёнок на среднем и крайнем стёклах (4И–10–4И–10–4)

Толщина двух стёкол однокамерного стеклопакета по 4 мм и зазор между ними 16 мм, а у двухкамерного стеклопакета три стекла толщиной по 4 мм и зазорами 10 мм.

Для исследования теплофизических свойств оконных стеклопакетов для ограждений зданий использовался заводской прибор: измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250 (размер испытываемого образца 250×250 мм толщиной 5...50 мм) предназначен для определения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и термического сопротивления  $R$  твердых строительных материалов, а также материалов, предназначенных для тепловой изоляции зданий при стационарном тепловом режиме.

Задавая в приборе ИТП-МГ4-250 значения температуры холодильника  $t_x$  от 5°C до 20°C и нагревателя  $t_n$  от 25°C до 46°C, получены значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического

сопротивления теплопроводности  $R$  и плотности теплового потока  $q$  однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с плёнками и без них.

В таблице 1 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств однокамерного (4–16–4) стеклопакета.

**Таблица 1**

Теплофизических свойств однокамерного  
стеклопакета (4–16–4)

$\delta$ , мм	$t_{\text{ср}}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{н}}$ , °C	$t_{\text{х}}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·K)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
24	15	20	25	5	0,149	0,161	124,2
	17,5	15	25	10	0,155	0,154	97
	20	10	25	15	0,162	0,148	67,6
	22	6	25	19	0,168	0,142	42,1
	22,5	7	26	19	0,168	0,142	49
	25	12	31	19	0,17	0,141	85
	25	20	35	15	0,169	0,142	140,8
	27,5	17	36	19	0,173	0,138	122,4
	30	20	40	20	0,177	0,135	147,4
	30	22	41	19	0,176	0,136	161,3

Средняя температура стеклопакета определяется по формуле:

$$t_{\text{ср}} = (t_{\text{н}} + t_{\text{х}}) / 2, \quad (1)$$

где  $t_{\text{н}}$  — температура нагревателя, °C;  $t_{\text{х}}$  — температура холодильника, °C.

Разность температур стеклопакета определяется по формуле:

$$\Delta t = t_{\text{н}} - t_{\text{х}}. \quad (2)$$

На рисунке 7 приведено экспериментальное распределение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{\text{ср}}$  однокамерного стеклопакета (4–16–4).

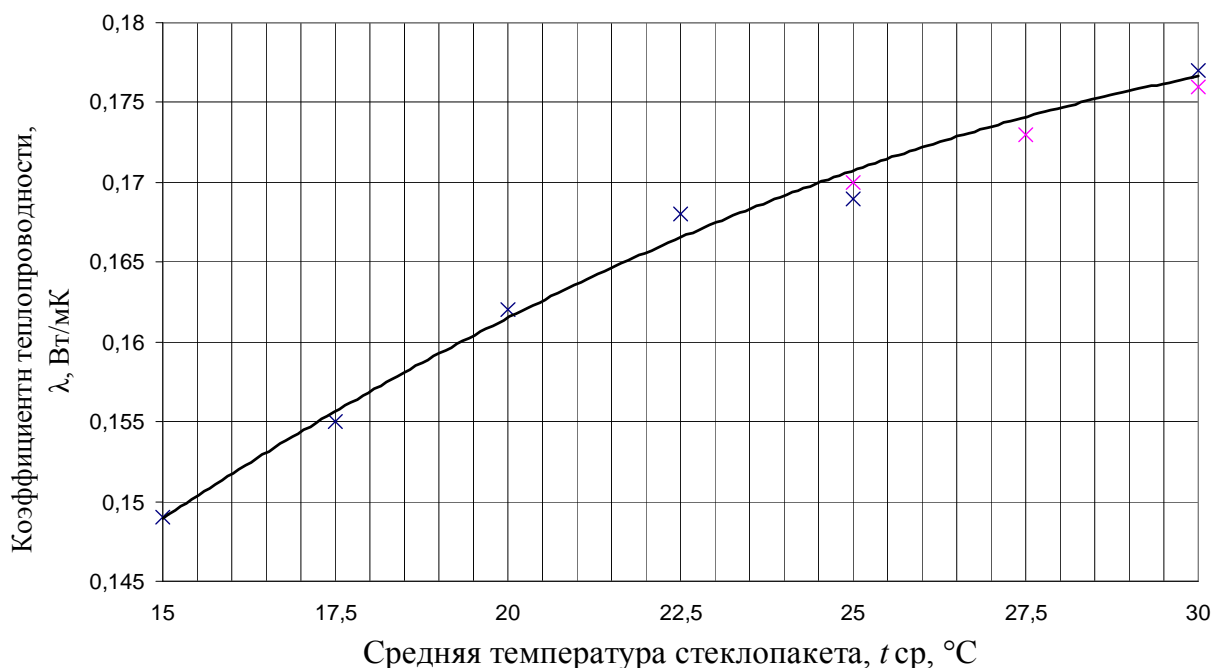


Рис. 7. Экспериментальные распределения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{ср}$  однокамерного стеклопакета (4–16–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры  $t_{ср}$  стеклопакета от 15 до 30°C коэффициент теплопроводности  $\lambda$  увеличивается на 18,1 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{ср} = 15^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,149 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{ср} = 30^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,177 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

На рисунке 8 приведены значения термического сопротивления теплопроводности  $R$  от средней температуры  $t_{ср}$  однокамерного стеклопакета (4–16–4).

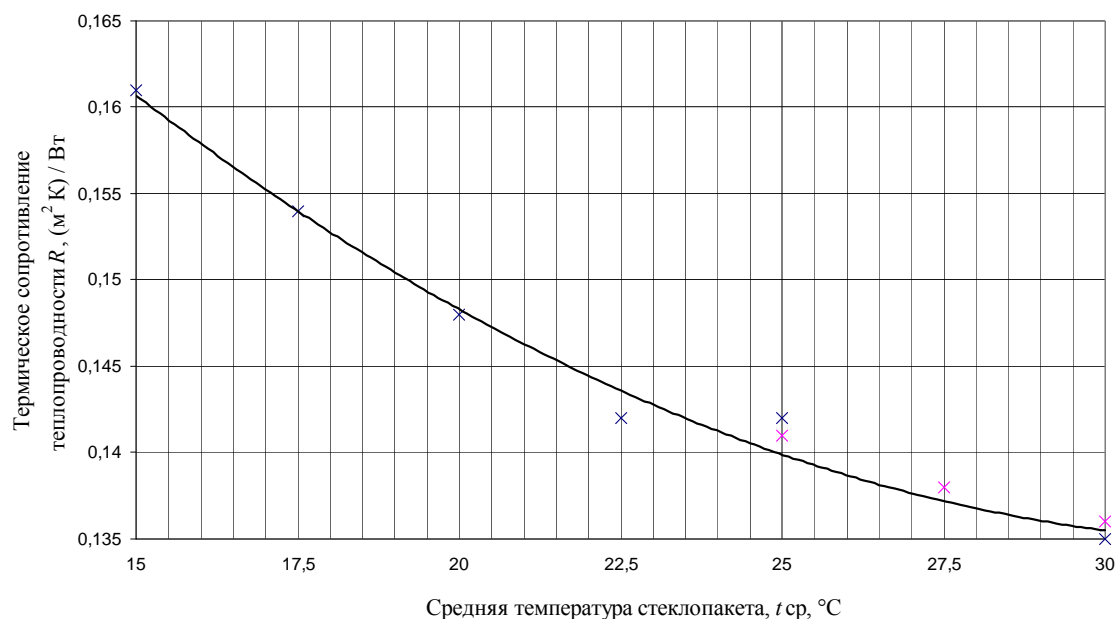


Рис. 8. Экспериментальные распределения термического сопротивления теплопроводности  $R$  от средней температуры  $t_{cp}$  однокамерного стеклопакета (4–16–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры стеклопакета от 15 до 30°C термическое сопротивление теплопроводности  $R$  уменьшается на 15,5 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{cp} = 15^\circ\text{C}$  термическое сопротивление теплопроводности  $R = 0,161 \text{ (м}^2\cdot\text{К) / Вт}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{cp} = 30^\circ\text{C}$  —  $R = 0,135 \text{ (м}^2\cdot\text{К) / Вт}$ .

На рисунке 9 приведены значения плотности теплового потока  $q$  от разницы температур  $\Delta t$  однокамерного стеклопакета (4–16–4).

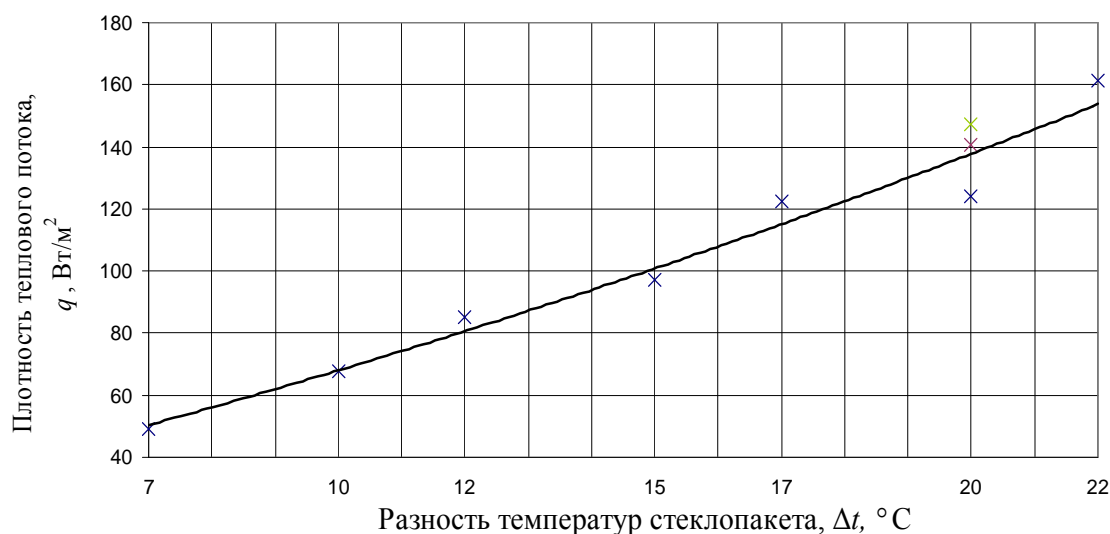


Рис. 9. Экспериментальные распределения плотности теплового потока  $q$  от разности температур  $\Delta t$  однокамерного стеклопакета (4–16–4)



По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием разности температуры стеклопакета  $\Delta t$  от 7 до 22°C плотность теплового потока  $q$  увеличивается на 229,2 %. Так, например, при разности температур стеклопакета  $\Delta t = 7$  °C плотность теплового потока  $q = 49$  Вт/м<sup>2</sup>, а при разности температур стеклопакета  $\Delta t = 22$ °C плотность теплового потока  $q = 161,3$  Вт/м<sup>2</sup>.

Аналогично были проведены экспериментальные исследования двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4). В таблице 2 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4).

**Таблица 2**

Теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета  
(4–10–4–10–4)

$\delta$ , мм	$t_{cp}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_n$ , °C	$t_x$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·K)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
32	15	20	25	5	0,116	0,275	72,5
	17,5	15	25	10	0,12	0,266	56,2
	18	14	25	11	0,119	0,268	52
	19	16	27	11	0,12	0,266	60
	20	10	25	15	0,123	0,26	38,4
	20	18	29	11	0,121	0,264	68,1
	22	6	25	19	0,128	0,25	24,9
	22	8	26	18	0,127	0,251	32,1
	22,5	25	35	10	0,124	0,258	96,9
	25	12	31	19	0,129	0,248	48,3
	27,5	17	36	19	0,131	0,244	69,6
	30	22	41	19	0,133	0,24	91,5
	32,5	27	46	19	0,136	0,235	114,7

На рисунке 10 приведены значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{cp}$  двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4).

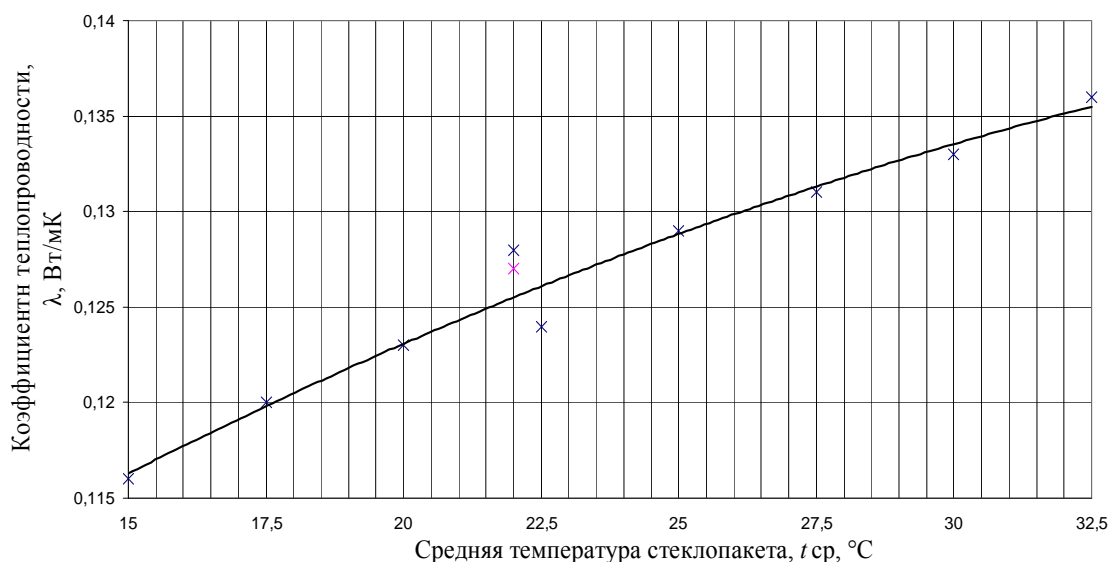


Рис. 10. Экспериментальные распределения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{ср}$  двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры  $t_{ср}$  стеклопакета от 15 до 32,5°C коэффициент теплопроводности  $\lambda$  увеличивается на 17,2 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{ср} = 15^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,116 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{ср} = 32,5^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,136 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ .

На рисунке 11 приведены значения термического сопротивления теплопроводности  $R$  от средней температуры  $t_{ср}$  двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4).

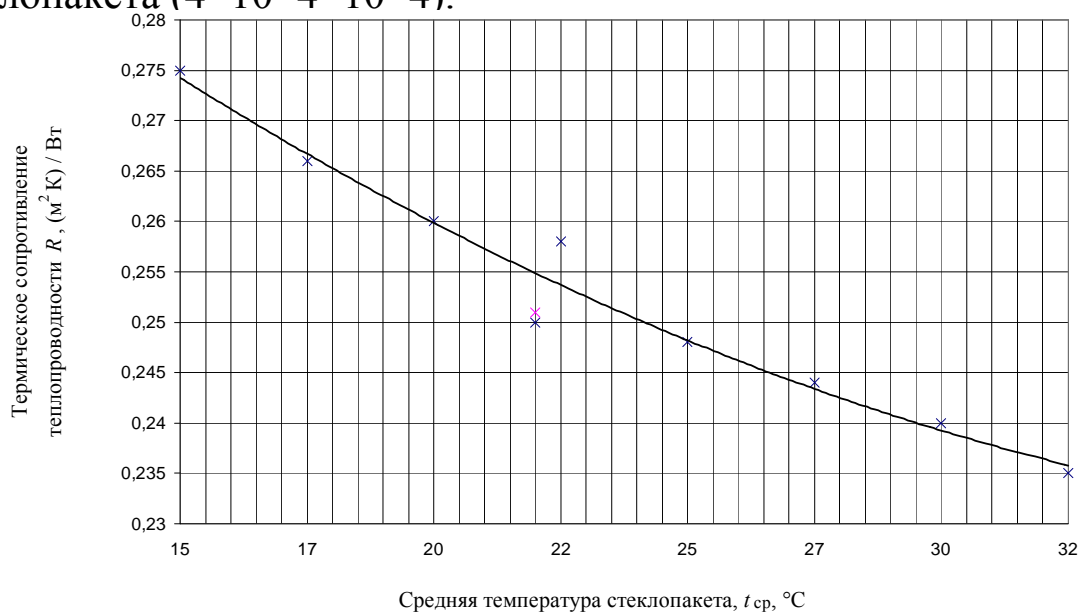


Рис. 11. Экспериментальное распределение термического сопротивления теплопроводности  $R$  от средней температуры  $t_{ср}$  двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры  $t_{\text{ср}}$  стеклопакета от 15 до 32,5°C термическое сопротивление теплопроводности уменьшается на 14,5 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{\text{ср}} = 15^\circ\text{C}$  термическое сопротивление теплопроводности  $R = 0,275 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{\text{ср}} = 32,5^\circ\text{C}$  термическое сопротивление теплопроводности  $R = 0,235 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ .

На рисунке 12 приведены значения плотности теплового потока  $q$  от разницы температур  $\Delta t$  двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4).

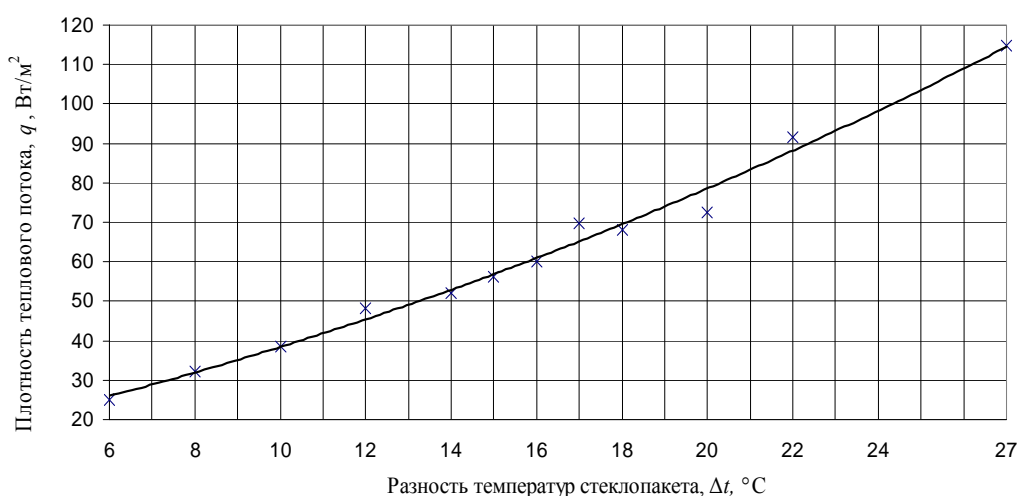


Рис. 12. Экспериментальные распределения плотности теплового потока  $q$  от разности температур  $\Delta t$  двухкамерного стеклопакета (4–10–4–10–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием разности температур  $\Delta t$  стеклопакета от 6 до 27°C плотность теплового потока  $q$  увеличивается на 360,6 %. Так, например, при разности температур стеклопакета равной  $\Delta t = 6^\circ\text{C}$  плотность теплового потока  $q = 24,9 \text{ Вт/м}^2$ , а при разности температур стеклопакета  $\Delta t = 25^\circ\text{C}$  плотность теплового потока  $q = 114,7 \text{ Вт/м}^2$ .

Также были исследованы однокамерные и двухкамерные стеклопакеты с теплозащитным покрытием — плёнкой (напылением). Рассмотрено влияние применения теплозащитной плёнки на теплофизические свойства стеклопакета. Стеклопакеты с энергосберегающими стёклами с низкоэмиссионным покрытием пропускают свет (в световом диапазоне) почти как обычное стекло, но

способны отражать обратно в помещение большую часть теплового (инфракрасного) излучения, а стёкла называют И-стёкла.

Кроме того, проведены исследования однокамерного стеклопакета с покрытием плёнкой (Бронза).

В таблице 3 и 4 соответственно приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств однокамерного стеклопакета с теплозащитной плёнкой (напылением) (4И–16–4) и теплозащитной плёнкой (Бронза) (4Бронза–16–4).

**Таблица 3**

Теплофизических свойства однокамерного стеклопакета с теплозащитной плёнкой (напыление) на одном стекле (4И–16–4)

$\delta$ , мм	$t_{\text{ср}}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{н}}$ , °C	$t_{\text{х}}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
24	15	20	25	5	0,048	0,50	40,0
	17,5	15	25	10	0,049	0,489	30,6

**Таблица 4**

Теплофизических свойства однокамерного стеклопакета с теплозащитной плёнкой (Бронза) на одном стекле (4Бронза–16–4)

$\delta$ , мм	$t_{\text{ср}}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{н}}$ , °C	$t_{\text{х}}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
24	15	20	25	5	0,151	0,158	125,8
	17,5	15	25	10	0,157	0,152	97,9

В таблице 5 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета (4И–10–4–10–И4) с теплозащитными плёнками на двух крайних стёклах.

**Таблица 5**

Теплофизических свойства двухкамерного стеклопакета с  
теплозащитными плёнками на двух крайних стёклах  
(4И–10–4–10–И4)

$\delta$ , мм	$t_{\text{ср}}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{н}}$ , °C	$t_{\text{х}}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
32	15	20	25	5	0,047	0,68	29,4
	17,5	15	25	10	0,047	0,68	22

В таблице 6 приведены теплофизические свойства стеклопакета с теплозащитными плёнками на среднем и крайнем стёклах (4И–10–4И–10–4). Плёнки расположены со стороны нагревателя.

**Таблица 6**

Теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с  
теплозащитными плёнками на среднем и крайнем стёклах (со  
стороны нагревателя) (4И–10–4И–10–4)

$\delta$ , мм	$t_{\text{ср}}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{н}}$ , °C	$t_{\text{х}}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
32	15	20	25	5	0,067	0,477	41,9
	17,5	15	25	10	0,068	0,47	31,9

В таблице 7 приведены теплофизические свойства стеклопакета с теплозащитными плёнками на среднем и крайнем стёклах (4И–10–4И–10–4). Плёнки расположены со стороны холодильника.

**Таблица 7**

Теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с теплозащитными плёнками на среднем и крайнем стёклах (со стороны холодильника) (4–10–И4–10–И4)

$\delta$ , мм	$t_{\text{ср}}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{н}}$ , °C	$t_{\text{х}}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
32	15	20	25	5	0,064	0,5	40
	17,5	15	25	10	0,065	0,492	30,4

Обобщённые результаты исследований теплофизических свойств однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с покрытием теплозащитной плёнкой и без неё приведены в таблице 8.

Таблица 8

Средние значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического сопротивления теплопроводности  $R$  и плотности теплового потока  $q$  однокамерного и двухкамерного стеклопакета

Свойства стеклопакета Вид стеклопакета	$\lambda_{\text{ср}},$ Вт/(м·°С)	$R_{\text{ср}},$ (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q_{\text{ср}},$ Вт/м <sup>2</sup>
Однокамерный стеклопакет без плёнки (4–16–4)	0,167	0,144	103,7
Однокамерный стеклопакет с плёнкой (Бронза) (4Бронза–16–4)	0,154	0,155	111,85
Однокамерный стеклопакет с плёнкой (напыление) (4И–16–4)	0,0485	0,4945	35,3
Двухкамерный стеклопакет без плёнки (4–10–4–10–4)	0,125	0,256	63,5
Двухкамерный стеклопакет с плёнкой (напылением) на крайнем и среднем стёклах (4И–10–4И–10–4)	0,0645	0,496	35,2
Двухкамерный стеклопакет с плёнкой (напылением) на двух крайних стёклах (4И–10–4–10–4И)	0,047	0,68	25,7

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерных стеклопакетов, с теплозащитной плёнкой (напыление), плёнкой (Бронза) и без плёнки, можно сделать выводы.

1. Наименьший коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{ср}} = 0,0485$  Вт/(м·°С) имеет однокамерный стеклопакет с плёнкой (напыление) (4И–16–4), что в три раза (в 3,44 раза) меньше коэффициента теплопроводности однокамерного стеклопакета без плёнки (4–16–4).

2. Самое высокое значение термического сопротивления теплопроводности  $R_{\text{ср}} = 0,4945$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт имеет однокамерный стеклопакет с плёнкой (напыление) (4И–16–4), что в 3,43 раза больше термического сопротивления теплопроводности однокамерного стеклопакета без плёнки (4–16–4).

3. Плотность теплового потока наибольшая в однокамерном стеклопакете с плёнкой (Бронза) (4Бронза–16–4), что в 3,17 раза больше чем плотность теплового потока однокамерного стеклопакета с плёнкой (напыление) (4И–16–И4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные двухкамерных стеклопакетов, с теплозащитной плёнкой и без плёнки, можно сделать выводы.

1. Наименьший коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{ср}} = 0,047$  Вт/(м·°С) имеет двухкамерный стеклопакет с плёнкой на двух крайних стёклах (4И–10–4–10–И4), что почти в три раза (в 2,66 раза) меньше коэффициента теплопроводности двухкамерного стеклопакета без плёнки (4–10–4–10–4).

2. Самое высокое значение термического сопротивления теплопроводности  $R_{\text{ср}} = 0,68$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт имеет двухкамерный стеклопакет с плёнкой на двух крайних стёклах (4И–10–4–10–И4), что в 2,66 раза больше термического сопротивления теплопроводности двухкамерного стеклопакета без плёнки (4–10–4–10–4).

3. Плотность теплового потока наибольшая в двухкамерном стеклопакете без плёнки (4–10–4–10–4), что в 2,47 раза больше чем плотность теплового потока двухкамерного стеклопакета с плёнкой на двух крайних стёклах (4И–10–4–10–И4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с теплозащитной плёнкой и без плёнки, можно сделать выводы.

1. Более оптимальным вариантом цена – качество теплофизических свойств, более предпочтительны: однокамерный стеклопакет с теплозащитной плёнкой (напылением) 4И–16–4.

2. Однако необходимо учитывать, что стоимость низкоэмиссионного стекла И (20...25 у.е./м<sup>2</sup>) в два раза превышает цену обычного стекла (8...12 у.е./м<sup>2</sup>).

3. Необходимо учитывать, что звукопоглощение выше в двухкамерном стеклопакете по сравнению с однокамерными стеклопакетами (в плане дальнейших исследований).

4. В литературе нет данных по сроку службы, долговечности и времени эксплуатации теплозащитных плёнок и напыления, что также представляется в планах дальнейшего исследования.

5. Необходимо провести исследования пластикового профиля оконных блоков от их толщины, количества камер и фирмы изготовителя (Rehau, Deseuninck favorit, KBE).

6. Необходимо провести исследование по соотношению размеров стеклопакета к пластиковому профилю.

7. В настоящее время разрабатываются научно-методологические основы экспериментального определения теплофизических свойств стеклопакетов методом неразрушающего контроля.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.
2. Патент на изобретение № 2421711 / Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов // Фокин В.М., Ковылин А.В.
3. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов / М.:Спектр, 2011. – 155 с.
4. Фокин В. М. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля / В. М. Фокин, А. В. Ковылин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер : Строительство и архитектура. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. – Вып.14 (33). – С. 123–127.
5. Ковылин А.В. Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий / А. В. Ковылин, В. М. Фокин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. – Вып. 21 (40). – С. 124–127.

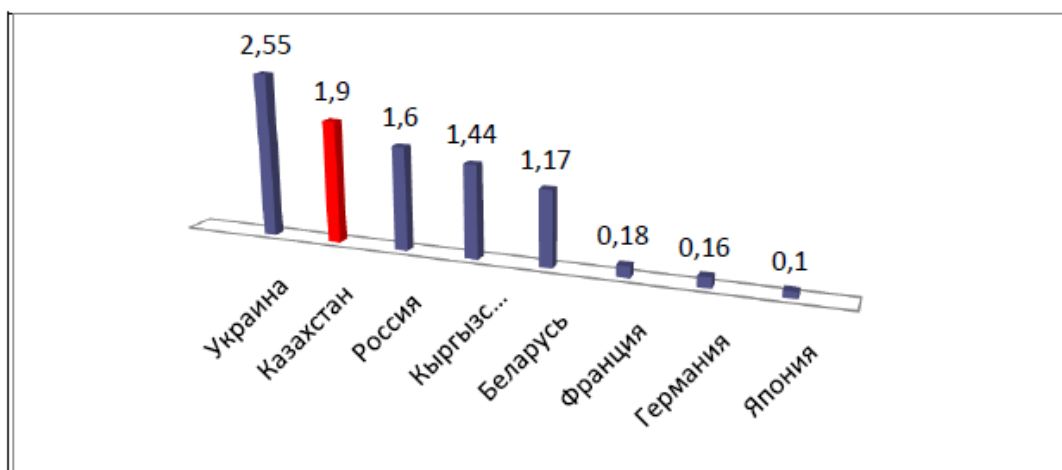


**Шахнов В.А**  
**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР В СФЕРЕ**  
**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**  
*МГТУ им. Н.Э. Баумана*  
shakhnov@mail.ru

**Энергоэффективность** подразумевает использование производствами или системами меньше энергоресурсов для достижения показателей производительности или даже их улучшения по сравнению с обычными производствами и системами. Эффективное использование энергии приводит к ее экономии, сокращении выплат по счетам за коммунальные услуги, и защите окружающей среды как следствие уменьшения потребления энергоресурсов и сокращения выбросов парниковых газов.

На самом деле, тема преимуществ повышения энергоэффективности не нова. Множество международных проектов, спонсируемых Европейской Комиссией, Программами Tacis, Thermie, USAID и другими организациями, начиная с 90-х, сделали энергоэффективность узнаваемым термином. Многие уже знают и рассматривают энергоэффективность, экономию энергоресурсов и сокращение выбросов, как очевидное условие конкурентоспособности компаний и наличия доступного и чистого источника энергообеспечения в будущем. Сегодня практически общеизвестно, что повышение энергоэффективности позволяет странам преодолевать давление, которое на них оказывает зависимость от энергоресурсов, решать вопросы ненадежности энергопоставок, неравенства, высоких цен и счетов за энергоресурсы, а также экологического вреда и ущерба здоровью. Собственники предприятий и менеджеры также понимают, что энергоэффективность – это ключ к конкурентоспособности компании на открытом рынке. Большинство стран СНГ являются очень энергоемкими. Например, в Казахстане, Украине и России (а также в других странах) удельное потребление энергии выше, чем в странах ЕС примерно в 3 раза, что означает, что эти страны потребляют на единицу ВВП в 3 раза больше энергоносителей.

**Энергоемкость ВВП стран в сравнении (тонна нефтяного эквивалента/1000\$)**



Необходимо снизить энергоёмкость ВВП РК не менее чем на 10% и 25% к 2015 и 2020 годам.

### **Об энергосбережении и повышении энергоэффективности**

Государственный энергетический реестр потребителей энергоресурсов:

#### **1. Проведение энергоаудита.**

Энергетический аудит предприятий проводится с целью оценки эффективности использования организациями топливно-энергетических ресурсов (электрической и тепловой энергии, природного и попутного газов, твердого топлива, нефти и продуктов ее переработки), выявления возможности экономии ресурсов и разработки комплекса мер по энергосбережению.

Выгода от внедрения мер по энергосбережению и повышению энергоэффективности:

- Снижение расходов на энергоресурсы - годовая экономия потребляемых энергоресурсов может в среднем составлять от 10% до 30%;
- Снижение себестоимости произведенных товаров и услуг;
- Повышение качества произведенных товаров и услуг;
- Повышение конкурентоспособности предприятия;
- Снижение рисков, связанных с повышением тарифов, нестабильной или неправильной работы инженерных систем.

Таким образом, энергоаудит необходим в том случае, если руководство предприятия, либо учреждения приняло для себя курс на снижение затрат на энергоресурсы, повышения качества производимой продукции, и повышения уровня энергетической безопасности предприятия.

***В РФ 23.11.2009 г вступил в силу Федеральный Закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» для определенного круга юридических лиц, которые должны провести обследование энергетического состояния объектов до 31 декабря 2012 года.***

Жесткие сроки проведения первичного (обязательного) энергетического обследования были установлены исключительно для предприятий, относящихся хотя бы к одной из следующих категорий:

- органы госвласти и местного самоуправления;
- компании с регулируемыми видами деятельности;
- организации с участием государства;
- предприятия, финансируемые бюджетами различного уровня;
- компании, добывающие, производящие, транспортирующие ТЭР
- юридические лица, затраты на ТЭР которых составляют более 10 млн. рублей

На сегодняшний день крайний срок проведения энергетического обследования, установленный законом, истек. Но это не значит, что проводить энергоаудит уже поздно. Ведь в конечном итоге энергетическое обследование организации – это вклад в экономию энергетических затрат на годы вперед.

## **2. Внедрение системы энергоменеджмента**

Компании, достигшие снижения энергоемкости производства за счет энергоменеджмента:

Dow Chemical	22% (экономия 4 млрд.долл) с 1994 по 2005 гг. В настоящее время добивается снижения еще на 25% с 2005 по 2015гг.
Toyota	Toyota's North American Energy Management Organization сократила энергоемкость на единицу произведенной продукции на 23% с 2002 года; энергосберегающая деятельность компании привела к экономии 9,2 млрд.долл.
Евросоюз	В Евросоюзе компании внедрившие системы энергоменеджмента достигли ежегодного снижения энергоемкости на 2-3% по сравнению с 1% снижением при ведении бизнеса по принципу «business as usual»

### **3. Снижение энергоемкости.**

Проблема рационального использования энергетических ресурсов приобретает все большую актуальность для мирового сообщества, а ее решение становится стратегической задачей для многих государств.

Отказаться от использования электричества невозможно, более того, развитие экономики требует увеличения мощностей, и к 2025 году прогнозируется удвоение спроса на электроэнергию.

Только использование современных технологий, обеспечивающих эффективное расходование энергетических ресурсов, позволит избежать дефицита.

По оценке Международного энергетического агентства, 19% всей потребляемой в мире электроэнергии расходуется на освещение. Современные световые технологии позволяют сэкономить до 40% потребляемой электроэнергии, что в мировом масштабе эквивалентно 106 млрд. евро экономии в год. С экологической точки зрения это соответствует:

- сокращению выбросов углекислого газа в атмосферу на 555 млн. тонн в год;
- ежегодному сбережению 2 тераватт электроэнергии;
- экономии 1,5 млрд. баррелей нефти.

Понимая, что внедрение современных энергосберегающих технологий возможно лишь посредством установления новых стандартов искусственного освещения, многие страны проводят планомерную политику в области разработки таких норм. Например, в США вступил в силу нормативный акт, который предполагал полный отказ от неэффективных источников света к 2014 году, при этом затраты сократились более чем на 20 млрд. долларов. В сентябре 2009 года Евросоюз запретил продажу ламп накаливания мощностью 100 Вт, а к 2012 году эта участь постигла все лампы накаливания.

Не только Северная Америка и страны ЕС провозгласили принятие мер, направленных на энергосбережение и благоприятствующих использованию энергосберегающих источников света. Новое законодательство в области энергосбережения, включающее в себя постепенное прекращение использования ламп накаливания, действует или разрабатывается в Австралии, Новой Зеландии, России, Казахстане, Японии, Южной Корее, Бразилии, Аргентине и других

странах. На замену должны прийти другие виды световых средств, например, светодиодные лампы. Потенциал энергосбережения составляет 30% от общего уровня энергопотребления. Между тем, полная замена устаревших осветительных приборов в домах, офисах, на торговых площадях и улицах может привести к 57-80% экономии электроэнергии, при условии окупаемости инвестиций в период от 2 до 5 лет. Возможности современной светотехники позволяют многократно снизить издержки в потреблении электроэнергии. Итоговая экономия достигается за счет применения современных энергосберегающих ламп, автоматических систем включения и выключения осветительного оборудования. Также учитывается использование новой оптики в светильниках и использование электронных пускорегулирующих аппаратов.

### **Основные тенденции в сфере освещения:**

- По всему миру растут расходы на электроэнергию, что обусловлено высокими ценами на нефть.
- Растет осведомленность об изменениях климата, принимаются соответствующие законы, что приводит к сокращению выбросов углекислого газа.
- Новые осветительные решения, создающие особую атмосферу и повышающие безопасность, становятся частью нашей жизни.
- Продолжает расти спрос на энергоэффективное освещение на развивающихся рынках.
- Бурно развиваются светодиодные технологии. На сегодняшний день большинство потребителей недостаточно осведомлены о возможностях экономии с помощью энергоэффективных технологий и пока не в полной мере доверяют их качеству. Это часто происходит из-за того, что на рынке появляются некачественные и не сертифицированные продукты, которые стоят дешевле, но по качеству существенно уступают изделиям известных, зарекомендовавших себя производителей. Поэтому при выборе изделия важно ориентироваться не только и не столько на стоимость лампы, сколько принимать во внимание другие факторы – производителя, качество изготовления, срок службы, гарантии по использованию и т.д.

### **4. Энергоэффективное освещение в городах.**

С точки зрения местных органов и государственных учрежде-

ний есть несколько основных сфер применения энергоэффективных световых технологий. В первую очередь, это уличное освещение, затраты на которое составляют до 90% всех энергозатрат, и здесь возможно сэкономить до 65% расходуемых средств. Следующая область – это освещение нежилых площадей: административных зданий, школ, офисов. Здесь от 40 до 75% энергии тратится исключительно на освещение, а возможная экономия составляет порядка 75%. Для крупного бизнеса переход на энергоэффективные световые решения позволит значительно сократить издержки и суммарную стоимость владения парком светотехнического оборудования. К примеру, в промышленности на освещении складских помещений и конвейерных линий возможна экономия до 60%. В продуктовой розничной торговле (преимущественно в освещении супермаркетов) потенциал экономии составит до 30%. Если говорить об уличном освещении, то хорошая видимость означает безопасность на дорогах и спокойствие на улицах в темное время суток. Качество подсветки позволяет изменить облик архитектурных ансамблей и исторических памятников. Существенная часть городского бюджета уходит на электроэнергию, которая часто расходуется крайне неэффективно. Энергосберегающие осветительные системы, которые в среднем снижают потребление энергии на 50%, могут стать основой муниципальных проектов, нацеленных на решение ряда экономических, экологических и социальных задач. Результат – новый финансовый потенциал, здоровая, безопасная атмосфера городского пространства, улучшение экологической ситуации и создание нового уникального облика города.

## **5. Экономия для домашних хозяйств.**

Если в государственном и коммерческом секторах переход на энергоэффективные технологии в освещении может быть осуществлен относительно централизованно, путем принятия стимулирующих мер и постепенного запрета установки устаревшего оборудования, то энергосбережение в домашних хозяйствах – более сложная задача. По оценкам экспертов, потенциальная экономия от перехода на энергоэффективные световые решения в домашнем хозяйстве составляет 30%, что эквивалентно 1,9 млрд. евро.

Сегодня в быту по-прежнему используются обычные лампы накаливания, которые работают до 1 тыс. часов, то есть примерно год. Обычную лампу накаливания мощностью 100 Ватт можно за-

менить 20 Ваттной энергосберегающей лампой: света будет столько же, лампа прослужит в 10 раз дольше, а расход электроэнергии уменьшится в пять раз. На сегодняшний день большинство потребителей недостаточно осведомлены о возможностях экономии с помощью энергоэффективных технологий и пока не в полной мере доверяют их качеству. Поэтому необходимо предоставить людям возможность на собственном опыте убедиться в эффективности энергосберегающих ламп. Важным препятствием к переходу на энергосберегающие лампы в быту является стойкое предубеждение потребителей о мнимой дороговизне ламп. Но потребители не учитывают, что стоимость складывается не только из цены самой лампы, но и расходов на потребляемую энергию. Так, при средней стоимости энергосберегающей лампы в 100 рублей, она служит в 10 раз дольше, а значит, не требует частой замены и потребляет в 5 раз меньше электроэнергии, что отражается на счетах за электричество. Таким образом, кажущаяся дешевой обычная лампа накаливания на самом деле обходится в течение, например, одного года в три раза дороже «дорогой» энергосберегающей лампы. Экономия, окупаемость и рентабельность инвестиций будут еще больше при расчете на три года и более.

### **Энергосбережение в Японии**

Нефтяной кризис 1973 г., больно ударив по Японии, остро поставил вопрос о необходимости сбережения энергии. После 1973 г. энергосбережение стало одним из основных направлений энергетической политики японского государства. Предпринимаются усилия по снижению энергоемкости новых жилых домов. Принятые в 1980 г. нормативы энергосбережения для жилых и общественных зданий предусматривали сокращение на 40% потребления энергии на отопление и кондиционирование воздуха за счет изменений в конструкции зданий, которые позволяют лучше проветривать помещения в жаркий период и сохранять тепло в холодное время. А в 1997 г. было принято решение ужесточить нормативы энергосбережения еще на 20%. Строительные компании, соблюдающие эти нормы, стимулируются более выгодными условиями кредитования. Тем не менее, не все в деле энергосбережения развивается гладко, например, в бытовом секторе. Поэтому сегодня в Японии уделяется большое внимание обучению граждан способам сбережения энергии. Совет потребительских организаций Осаки отобрал группу из

200 семей, которым были предложены 6 способов сбережения энергии. Среди них был отказ от пультов дистанционного управления электронной аппаратурой (аппаратура, находящаяся в положении «stand-by» продолжает потреблять электричество, хотя и в меньших масштабах), а также ежедневные добровольные выключения кондиционеров на 1 ч в августе месяце, на который приходится пик потребления электричества. Подсчеты показали, что в ходе эксперимента экономия составила 14,2% от обычно потребляемой электроэнергии. В ходе аналогичного эксперимента в токийском районе Сэтагая, охватившем 1500 семей, выяснилось, что большую экономию электроэнергии дал отказ от поддержания высокой температуры воды в электрочайниках в течение ночи с тем, чтобы сэкономить время для приготовления пищи утром перед уходом на работу. С 1973 г., одновременно с разработкой мер по энергосбережению, в Японии начались активные работы по развитию гелиоэнергетики. Тогда 1 Ватт выработанной солнечной батареей энергии обходился в 30 тыс. иен. К 2000 г. этот показатель удалось снизить до 140 иен. Такой уровень себестоимости делает целесообразным использование солнечных батарей в быту. По данным на конец 1997 г. солнечные батареи были установлены на 8 тыс. жилых домов, причем правительство оплачивало треть стоимости установки батарей. К концу 2010 г. предполагалось установить солнечные батареи на 1 млн жилых домов. Средняя площадь крыши типичного японского дома составляет 120 м<sup>2</sup>. Если половину этой площади покрыть солнечными батареями, то можно получить 6 тыс. кВт.ч энергии в год в каждом доме даже при том, что батареи имеют КПД только 10%. В пересчете на нефтепродукты - это 558 л. нефти. Проблема энергосбережения стоит в Японии очень остро, и объясняется это в первую очередь бедностью страны естественными энергоносителями, прежде всего нефтью. В настоящее время Япония вынуждена импортировать 80% необходимых ей энергоносителей. В 1979 г. в Японии начал действовать закон об энергосбережении. Он касался крупных промышленных предприятий, на которые тогда приходилось 70% потреблявшейся энергии. Наряду с разработкой мер по сокращению потребления электроэнергии закон предписывал осуществлять рационализацию процесса сжигания топлива, сокращать потери тепла при транспортировке, сводить к минимуму неиспользуемые объемы энергии. Предприятия, не прилагавшие усилия в этом направлении, подвергались крупным штрафам. В 2003 г. этот закон был расширен. Теперь его действие распростра-



няется и на других крупных потребителей энергии - большие офисные здания, универмаги, гостиницы и больницы. Вот несколько примеров конкретного применения этого закона в жизнь. Завод по производству фотобумаги компании «Коника» в городе Одавара (префектура Тиба) за 10 последних лет на 40% поднял эффективность энергопользования. На заводе была повышена энергоэффективность котельной, а также налажено естественное охлаждение промышленной воды в зимний период, использование зимой естественного сухого воздуха в системе кондиционирования, расширено вторичное применение тепловых отходов на производстве. Крупная токийская гостиница установила у себя специальную энергосберегающую систему, разработанную компанией «Яма-такэ». Эта система предусматривает установку во всех помещениях здания датчиков температуры и потребления электричества. Их данные анализируются компьютером, который на этой основе выбирает оптимальный режим температуры и расхода электроэнергии в помещениях гостиницы. В ресторанных залах действуют аппараты, которые автоматически очищают воздух в зависимости от концентрации углекислого газа. Эта энергосберегающая система позволяет администрации гостиницы экономить на электроэнергии до 80 млн иен в год. На острове Сикоку одна из местных компаний разработала экспериментальную систему электросбережения в частных домах. Она состоит из датчиков, устанавливаемых в комнатах дома, которые фиксируют расход электроэнергии. Система сама отключает свет в тех помещениях дома, в которых в данный момент никого нет. Режим работы кондиционеров воздуха может изменяться в соответствии с указаниями электрокомпании, связь с которой поддерживается с помощью мобильных телефонов. Подсчитано, что за год система позволяет сократить потребление электроэнергии в доме на 20%. Подобные системы призваны помочь претворению в жизнь правительственных намерений по сокращению потребления электроэнергии бытовыми электроприборами, в том числе кондиционерами воздуха - на 63%, холодильниками - на 30% и т.д. Правительство Японии в 2010 г. довело долю электроэнергии, получаемой из так называемых возобновляемых энергоресурсов, до 1,5% от общего объема производимой электроэнергии.

### **Энергосбережение в Германии**

Постоянный рост цен на газ и другие энергоносители, а также зависимость Германии от стран-экспортеров, которая дала о себе знать и

во время конфликта между Россией и Украиной, послужил поводом для нового витка дебатов о немецкой энергетической политике.

Краеугольными темами дискуссии являются поддержание стабильности системы смешанного энергообеспечения, стимулирование внутри германского производства энергии за счет использования угля и альтернативных источников энергии, а также регулирование и демонополизация немецкой газотранспортной системы. Доля экспортируемых Германией энергоносителей составляет на сегодняшний день около 80%. Никакой другой энергоноситель не делает ее такой зависимой от иностранных экспортеров, как газ. Только 16% потребляемого газа добываются в Германии, оставшиеся 84% поставляются из Норвегии, Голландии и России. Дилемму энергетической безопасности Германия пытается решить путем энергосбережения и поддержания стабильной системы смешанного энергообеспечения. В том числе, государственными дотациями стимулируются экологичные альтернативные виды энергии и добыча бурого и каменного угля. Как один из вариантов рассматривается импорт сжиженного газа, поставки которого могут осуществляться в танкерах, минуя газопроводы. От возвращения к атомной энергетике ФРГ, тем не менее, отказывается. Конечно, отказаться от импорта газа, доля которого в энергопотреблении страны составляет по данным на 2004 г. 23%, или 101 млрд м<sup>3</sup>, в принципе невозможно. То же самое касается и импорта нефти. При этом газ обходится конечному потребителю почти вдвое дороже, чем всего пять лет назад, и только за период с января 2004 г. по октябрь 2005 г. импортная цена на газ возросла приблизительно на 60%. Очевидно, что в долгосрочной перспективе цены на энергоносители будут расти и дальше. С начала 2006 г. вступила в действие директива «Энергетические характеристики зданий», положения которой нашли свое отражение в национальном законодательстве стран - членов Евросоюза. Согласно этой директиве, разработанной Европейским парламентом и Советом Евросоюза, общая энергоэффективность здания - это количество энергии, потребляемое им, помимо прочего, на отопление, горячее водоснабжение, вентиляцию, кондиционирование воздуха и освещение. Поскольку здания становятся энергетическими системами, очень важно наладить взаимодействие различных отраслей. Что касается Германии, то положения директивы ЕС введены в существующий национальный закон (нормы) EnEv, относящийся к энергосбережению.

Важно отметить, что внедрение энергосбережения в Германии финансируют банки и крупные корпорации, а не государство.

Капитал DENA - Немецкое Энергетическое Агентство (Die Deutsche Energie-Agentur GmbH - DENA), общество с ограниченной ответственностью, создано в 2000 г. в Берлине, являющееся федеральной структурой. Его учредителями являются государство ФРГ и финансовый институт - Кредитное ведомство восстановления и развития (KfW). Это право поровну делится между федеральным правительством и банковской группой KfW.

Германия является страной, которая наиболее активно использует современные технологии энергосбережения и альтернативные источники энергии. Сегодня уже треть всей электроэнергии здесь получают от ветроустановок. Берлин намерен экономить на энергоносителях за счет альтернативных источников энергии. Все бассейны будут оснащены солнечными батареями. Частные инвесторы получают возможность разместить на крышах общественных зданий более 100 000 м<sup>2</sup> солнечных батарей и подавать полученную энергию в городскую сеть. С 2007 г. администрация Берлина закупала для своих нужд лишь автомобили, потребляющие в городском цикле не более 6,5 л бензина на 100 км пробега. С 2011 г. граница допустимого расхода снижена до 5 л. При приобретении компьютеров и других электронных приборов, административные учреждения Берлина останавливают свой выбор на продуктах, потребляющих наименьшее количество электричества.

### **Энергосбережение в Китае**

Председатель Государственного комитета КНР по делам развития и реформ на Всекитайском рабочем совещании по экономии энергии отметил необходимость осуществлять строгий контроль при утверждении новых проектов, предполагающих высокие энергозатраты. По его словам, при санкционировании новых проектов принудительным «порогом» станут стандарты в отношении энергозатрат. На том же совещании заместитель председателя Госкомитета КНР по делам развития и реформ подписал с 30 администрациями провинциального уровня документ, предусматривающий на период 2006-2010 гг. ответственность провинциальных правительств за достижение целей энергосбережения. В документе указаны показатели в области энергосбережения, которые должны обеспечить различные районы и ведущие предприятия районов, в том числе и

центральные предприятия. В начале 2006 г. года китайское правительство наметило цель: в 2006 г. на 4% снизить энергозатраты на производство единицы ВВП. Однако в первом полугодии рост энергопотребления опережал рост ВВП, а к концу 2006 г. энергозатраты на единицу ВВП в Китае снизились всего на 1,23% по сравнению с показателем предыдущего года. Это было первое снижение энергозатрат на производство единицы ВВП в Китае за период с 2003 г. Согласно 11-му пятилетнему плану (2006-2010 гг.) народнохозяйственного и социального развития, в 2010 г. энергозатраты на единицу ВВП должны были снизиться на 20% по сравнению с показателем, зарегистрированным в конце 10-й «пятилетки». Но реализация плана удалась стране лишь на 14%. По словам министра промышленности и информатизации КНР, в 2010 г. все провинции страны создали списки предприятий с высоким энергопотреблением и отсталой производственной мощностью, которые в дальнейшем были закрыты. Одной из важнейших причин невыполнения в 2006 г. задачи по энергосбережению является неудавшееся изменение модели экономического роста. В настоящее время рост китайской экономики стал возможным главным образом за счет развития промышленности, в которой доля тяжелой и химической отраслей с высокими энергозатратами оказалась достаточно большой. Таким образом, экономический рост в стране чрезмерно зависит от энергозатрат и расходования ресурсов. Сочетание финансово-налоговой и промышленной политик направленных на энергосбережение, должно способствовать улучшению структуры производства и повышению его уровня. При разработке нового закона о корпоративном подоходном налоге с учетом необходимости унификации налоговых обязательств отечественных предприятий и предприятий с участием иностранного капитала, по мнению правительства, следует рассмотреть возможность заложить статью о применении энергосберегающего оборудования в качестве определенного условия для предоставления налоговых льгот.

### **Энергосбережение в Норвегии**

Разработка программ по энергоэффективности в Норвегии началась в конце 1970-х гг. с подготовки нескольких планов, представляемых в виде отчетов в Норвежский Парламент (Планы по энергоэффективности). 1990-е годы можно описать как период кор-

ректировки программ по энергоэффективности с учетом либерализации рынка электроэнергии, произошедшей в Норвегии в 1991-1992 гг. Период после 2000 г. можно описать как период реорганизации правительственных структур в более узконаправленные (целевые) учреждения и постановку целей по развитию возобновляемой энергетики. Таким образом, норвежский опыт можно охарактеризовать как процесс обеспечения энергоэффективности с учетом всех аспектов либерализованных рынков, целевого планирования и защиты окружающей среды. Главным принципом в области электроэнергетики в Норвегии с конца 1980-х гг. является то, что цены на электроэнергию должны отражать ее рыночную стоимость, аналогично принципу либерализации энергетического рынка в России. Высокие цены на электроэнергию, отражающие ее реальную стоимость, сделают инвестиции в сектор энергоэффективности более рентабельными, в то время как низкие цены делают их менее прибыльными. В Норвегии также уделяется большое внимание вопросам эффективности энергоемких отраслей промышленности (производство алюминия, ферросплавов) и сокращения объемов использования электроэнергии для бытового отопления, создаются программы инвестиционной поддержки в отношении особых демонстрационных и опытных проектов. Уже много лет введены образовательные программы по совершенствованию навыков реализации программ по повышению энергоэффективности и развитию технологий в организациях, отвечающих за эксплуатацию зданий.

### **Энергосбережение в Австрии**

С 1980 г. в Австрии действуют новые строительные требования к теплоизоляции. С учетом этих и около десятка других нормативных актов ведутся расчеты по потреблению. К примеру, местные домашние хозяйства тратят на отопление жилья и горячую воду ежегодно около 2,5 млрд евро. С учетом дополнительной потребности еще 1,5 млрд евро. В целом на это тратится около 4,5% бюджета хозяйств. Все скрупулезно просчитав, австрийцы знают, как сэкономить в длинной цепи от производителя к потребителю. В Австрии считают, что, использовать твердое топливо (полезные ископаемые) не выгодно, поэтому его постепенно перестали использовать, начиная с 2003 г. Сдают свои позиции и дрова, но не окончательно, т.к. известно, что в стране имеется 450 тыс. печей. Но если будет принято решение перевести их на газ, изменится весь рынок отопительных приборов. Все это тоже просчитано, вплоть до учета повышения цен на газ. Довольно интересны расчеты по по-

треблению электроэнергии в промышленности. Они такие же очень тщательные, как и в жилищном секторе. Статистика свидетельствует - австрийская промышленность, которая дает около 24% валового национального продукта страны, потребляет немногим более 30% электроэнергии (это частица от общего конечного объема потребления). Поскольку большинство австрийских предприятий по местным и европейским меркам являются средними и мелкими, у них не хватает ни сил, ни средств для энергосбережения, это берет на себя государство. В стране есть целая структура организаций, осуществляющих помощь в вопросах энергосбережения и энергоэффективности. К примеру, Палата экономики Австрии со своей региональной сетью во всех девяти федеральных землях, Ассоциация отраслей промышленности, Австрийская ассоциация потребителей, Австрийское агентство по эффективному использованию энергии, которое разрабатывает методы и средства повышения энергоэффективности в промышленности. Не стоят в стороне и министерства, другие властные структуры, предоставляя разные услуги или же финансируя работы по энергосбережению. Кроме того, государство через специальный банк финансирования коммунальных экологических инвестиций и консалтинговых проектов выделяет федеральные субсидии. Эти средства распределяются по нескольким направлениям: предприятиям на охрану окружающей среды и энергосбережение (25%), инвестиции для оборудования ТЭЦ (от 10 до 20%), гранты на улучшение тепловых характеристик старых домов (25-30%). Так всем австрийским миром, при самой активной поддержке законопослушного и рачительного общества, в стране достигли такой экономии энергоресурсов, что ее опыт стал международным достоянием.

### **Энергосбережение в Швеции**

Правительство Швеции проводит действенную политику энергосбережения и энергоэффективности, которая имеет положительные результаты. И это отражается на высоком уровне сознания общества относительно преимуществ энергоэффективных технологий и биоэнергетики.

Первая программа энергосбережения была принята в Швеции в 1970-е годы, по следам ударившего по западным странам нефтяного кризиса. В Швеции настроена четкая система контроля за использованием энергоресурсов. Это можно видеть в обязательных декларациях для предприятий по использованию энергетических ресурсов, энергопаспортах зданий, в маркировке товаров, и даже в

маркировке продуктов питания.

Кроме этого чиновники активно используют экономические стимулы для популяризации использования альтернативных и нетрадиционных источников энергии. Освобождение сроком на 5 лет от энергетического налога, субсидии государства для реконструкции старых зданий (замена котлов, утепление и т.д.), упрощенное получение разрешений по строительству ветровых электростанций. Не остается в стороне и административный метод управления. Это касается крупных заправочных станций, где обязательна продажа альтернативного топлива помимо традиционных бензина и дизельного топлива. Основной акцент сделан на экономических методах управления - налоги, дотации и субсидии, торговля квотами и торговля электрическими сертификатами. Шведские муниципалитеты поражают абсолютной чистотой территорией. Оно и неудивительно, так как остатки продуктов потребления тоже перерабатываются. К примеру, в городке Вестерос, с 200 000 населения, работает завод по производству биогаза из отходов продуктов питания. На производимом газе (а не на дизеле или бензине) в Швеции работает весь муниципальный транспорт. Кроме этого, биогаз применяют и для производства электроэнергии, но это обычно для собственных нужд предприятий, либо в случае кризисов в энергетике. Еще одной особенностью шведской сферы энергетики, в частности, муниципалитетов является централизованное отопление и централизованное охлаждение помещений, в том числе и офисных мест общего пользования людей (супермаркеты, выставочные залы). Реализуется это все за счет работы станций тепловых насосов. Сырьем, в данном случае, является потенциал земли и воды. Примером может служить станция в самом Стокгольме, она обеспечивает централизованно теплом и холодом 400000 население города. В Швеции неуклонно растет интерес к тепловым насосам мощностью в 25-40 кВт для многоквартирных домов или офисов. Они весьма энергоэффективны и уменьшают вредное воздействие на окружающую среду. В Швеции сейчас действует более 500 000 тепловых насосов.

**Бородуля В.А.**  
**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ**  
**ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ**  
**КОТЛОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ**  
***ИТМО, НАН, Минск, Республика Белоруссия***

**ВВЕДЕНИЕ**

Решение проблемы снижения вредных выбросов с дымовыми газами осложняется необходимостью более широкого использования в энергетике низкосортного твердого топлива и прежде всего углей с высоким содержанием серы и золы, ресурсы которых значительно превосходят ресурсы нефти и газа, однако используются сравнительно мало [1].

Принципиально новым технологическим решением при производстве электроэнергии и тепла является сжигание твердого топлива в псевдоожиженном (кипящем слое (КС) или циркулирующим кипящим слое (ЦКС)) слое при температурах до 900—950 °С с размещением в топочной камере теплообменных поверхностей. Полученный пар используется в обычном паротурбинном процессе. Котлоагрегаты с псевдоожиженным слоем под давлением могут найти применение в комбинированном цикле с подачей горячих газов после их очистки от твердых частиц в газовую турбину.

Применение техники псевдоожижения в теплоэнергетике комплексно решает проблемы снижения вредных выбросов в окружающую среду, уменьшения габаритов и металлоемкости котлоагрегатов, повышает их эксплуатационную надежность, не предъявляя высоких требований к качеству топлива и стабильности его характеристик [2].

В соответствии с энергетической стратегией России до 2030 года [3] в части генерации электроэнергии предлагается:

- создание конденсационных энергоблоков на суперсверхкритических параметрах пара;
- создание энергоблоков с внутрицикловой газификацией угля и с котлами ЦКС;
- создание тепловых электростанций на твёрдом топливе с нулевыми выбросами парниковых газов



## 1. ПСЕВДООЖИЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Предположим, что слой мелкозернистого материала, состоящего, например, из частиц угля, известняка и золы, продувается воздушным потоком, подаваемым с небольшой скоростью. Газ при этом просто фильтруется через пустоты между частицами, не нарушая их положения (рис. 1). С увеличением скорости потока гидравлическое сопротивление слоя  $\Delta P_{\text{сл}}$  возрастает до тех пор, пока не достигнет величины, равной весу слоя. При этом вес отдельных частиц уравнивается силами трения о них, граница слоя от первоначальной высоты  $H_0$  перемещается к  $H$ . Частицы в этих условиях не остаются неподвижными, а начинают совершать колебательные движения с малыми амплитудами, оказываясь как бы взвешенными в потоке газа. Слой при этом приобретает текучесть, как жидкость (отсюда название слоя - псевдоожигенный). Скорость газа  $u_0$ , при которой слой переходит во взвешенное состояние, называется скоростью начала псевдоожигения, или критической. Повышение скорости потока газа выше критической вызывает более интенсивное движение отдельных частиц и дальнейшее увеличение высоты слоя (увеличивается доля пустот – порозность слоя), который становится высокотурбулентным, что способствует хорошему перемешиванию частиц. При еще более высокой скорости (скорости уноса)  $u_y$  частицы подхватываются потоком и выносятся из слоя. Псевдоожигенные системы имеют ряд преимуществ, обусловивших их широкое применение в ряде отраслей промышленности. Наиболее важные из них — обеспечение весьма интенсивного тепло- и массопереноса между газом и частицами, текучесть слоя и его изотермичность. К числу недостатков псевдоожигенного слоя следует отнести его неоднородность, связанную с возникновением и движением пузырей при псевдоожигении системы потоком газа, а также истирание и унос газом частиц; эрозию помещенных в слой поверхностей из-за абразивного действия частиц; агломерацию и спекание частиц при высоких температурах.

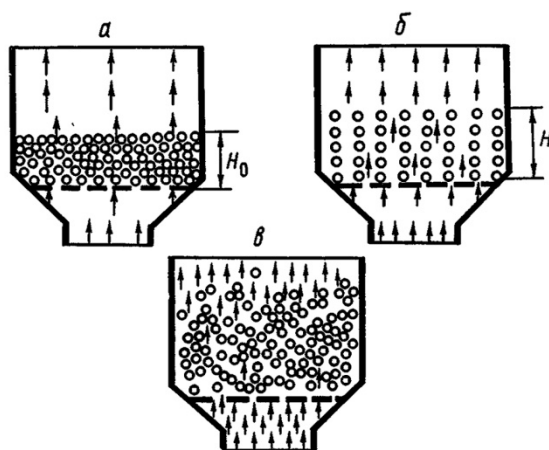


Рис.1 Схема образования псевдоожиженного слоя

Из многих эмпирических уравнений и корреляций, используемых для расчета начальной и предельной скорости псевдоожижения, наиболее широко используются универсальные зависимости, предложенные О. М. Тодесом [4]. Уравнения применимы для моно- и поли- дисперсных слоев с частицами сферической и неправильной формы в широком диапазоне чисел Рейнольдса и позволяют определять  $u_0$  и  $u_y$  с точностью в пределе 30%.

Одним из значительных преимуществ псевдоожиженных систем является, как известно, высокая интенсивность переноса тепла. Можно выделить три основных вида теплообмена в псевдоожиженном слое:

1. теплообмен псевдоожижаемого инертного материала с горящими углеродными частицами и поступающим в топочное устройство газовым потоком;
2. теплоперенос из одного участка псевдоожиженного слоя в другой;
3. теплообмен псевдоожиженного слоя со стенками топочного устройства, а также с помещенными в слой поверхностями теплообменников, конструктивно оформленных обычно в виде трубных пучков.

Резкое возрастание коэффициента теплообмена  $\alpha_q$  в псевдоожиженном слое по сравнению с неподвижным связано с наличием движения твердых частиц около теплообменной поверхности, что приводит к уменьшению толщины пограничной пленки газа, а интенсивное перемешивание частиц обеспечивает высокий перепад температур, улучшающий теплоотдачу. Типичный вид кривой зависимости  $\alpha_q$  от скорости газового потока представлен на рис. 2.

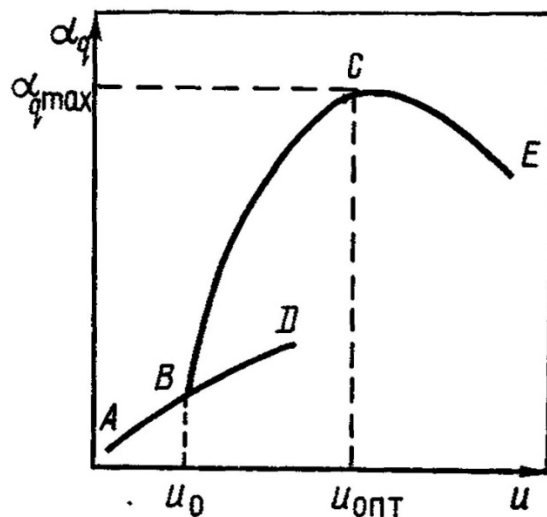


Рис.2 Зависимость  $\alpha$  от скорости псевдоожижения

Наблюдаемый максимум коэффициента теплообмена  $\alpha_q$  приближенно объясняется противоположным влиянием двух факторов: возрастанием скорости газового потока, что приводит к увеличению интенсивности движения частиц и росту  $\alpha_q$ , но одновременно с этим увеличивается средняя порозность слоя, которая вызывает уменьшение  $\alpha_q$ . При невысоких значениях  $u$  в большей степени сказывается интенсивность движения частиц, влияние которой затем подавляется возрастанием порозности [5].

## 2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Интерес к сжиганию твердого топлива в псевдоожиженном слое в нашей стране, а также в странах Западной Европы и США появился более 50 лет назад и был вызван стремлением найти эффективные способы сжигания трудносжигаемых обычными методами топлив в топках котлов малой мощности. В 1960 г. в Англии начинаются исследования, в которых метод сжигания в псевдоожиженном слое рассматривается с принципиально новых позиций. Был сделан вывод, что имеется возможность использовать псевдоожиженный слой не только как источник получения тепла, воспринимаемого расположенными вне слоя поверхностями, но и как первичный теплообменник путем размещения непосредственно в слое поверхностей нагрева. Перспективность такого конструктивного решения для топочной техники была отмечена С. С. Забродским

[6]. Тем самым было положено начало использованию в теплоэнергетике двух достоинств псевдоожиженного слоя: интенсивного перемешивания частиц, а также высокого коэффициента теплоотдачи от частиц к поверхности, погруженной непосредственно в слой.

При организации процесса сжигания твердого топлива псевдоожиженный слой состоит в основном из инертных минеральных веществ, представляющих собой образовавшуюся в результате горения золу, и известняка или доломита, добавляемых для связывания двуокиси серы. Во время горения в слой постоянно подается топливо в количестве, необходимом для получения желаемой тепловой мощности, причем содержание горючего вещества в слое составляет 1—2% по углероду. Расход оживающего газа (воздуха) поддерживается на уровне, обеспечивающем устойчивое псевдоожижение и горение. Температура слоя обычно составляет 750—950 °С, где более низкая температура вызвана пределом устойчивого горения, а более высокая—работой слоя, свободного от спекания, а также оптимальными условиями связывания серы и снижения выбросов окислов азота.

При размещении в псевдоожиженном слое труб, через которые движется теплоноситель, например вода или пар, появляется возможность отводить образующееся при сжигании топлива тепло. Такая организация топочного процесса позволяет значительно увеличить объем зоны горения и одновременно сбалансировать тепловыделение с отводом тепла через погруженные теплообменные поверхности.

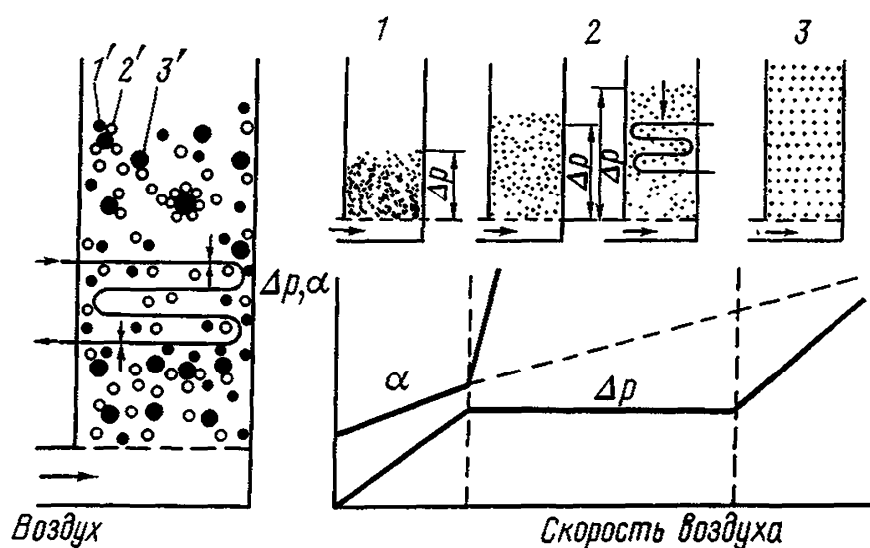


Рис.3 Принцип работы топки с псевдоожиженным слоем и ее место среди известных способов сжигания угля.

Слева на рис. 3 изображена схема псевдоожиженного слоя, в котором сжигается уголь. Частицы угля крупностью до 6 мм показаны в виде черных точек (1' — частицы угля; 2' — частицы известняка; 3' — частицы золы).

Справа на рис. 3 показаны некоторые характеристики процесса сжигания твердого топлива в псевдоожиженном слое, а также его место среди других известных технологических процессов сжигания. Неподвижный слой 1 соответствует слоевой топке, а область витающей пыли 3 — пылевой. Псевдоожиженный слой 2 занимает промежуточное положение.

Отметим высокую интенсивность переноса тепла от псевдоожиженного слоя к поверхности теплообмена. Это обстоятельство означает, что при небольшой площади теплообменника можно осуществлять отвод значительного количества тепла. Располагая нагреваемые теплообменные трубы в относительно небольшом пространстве, конструкция топочного устройства с псевдоожиженным слоем получается более компактной.

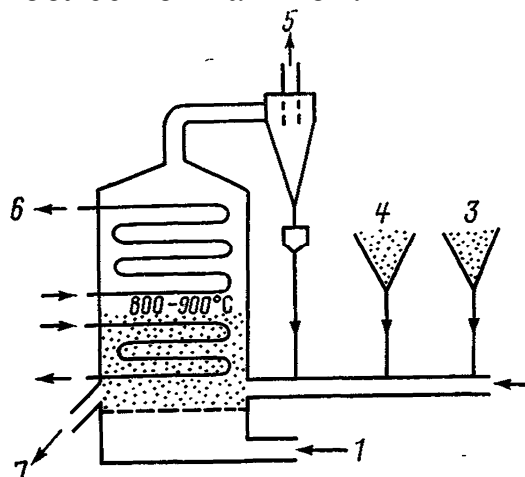


Рис. 4 Принципиальная схема топочного устройства с псевдоожиженным слоем

Принципиальная технологическая схема топочного устройства с псевдоожиженным слоем представлена на рис. 4. В топке над проницаемым дном находится мелкозернистый инертный материал, через который проходит воздух 1, необходимый для устойчивого горения и псевдоожижения. Уголь 4 и известняк 3 дозируются в воздушный поток 2 и вдуваются в псевдоожиженный слой. Образующееся при сжигании топлива тепло отводится через расположенные в слое теплообменные поверхности. Отходящий газ 5, имеющий примерно температуру псевдоожиженного слоя, охлаждается в помещенном в надслоевое пространство пучке труб 6.

Полученный пар подается в обычную паровую турбину для выработки электроэнергии, а отходящие газы очищаются от пыли, которая вновь подается в псевдоожиженный слой (ЦКС), так как содержит некоторое количество несгоревшего углерода. Зола вместе с серосодержащей присадкой выгружается через трубу 7.

Если топочное устройство эксплуатируется при повышенном давлении, горячие газы горения после обеспыливания поступают в газовую турбину. Необходимое тепловыделение и температура в слое регулируются подачей топлива и воздуха.

### **3. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ**

Достоверная оценка экономичности топок с псевдоожиженным слоем применительно к отмеченным выше областям практического применения может быть выполнена после их строительства и эксплуатации.

Анализ многочисленных материалов указывает на перспективность использования техники псевдоожижения в производстве электроэнергии и тепла с точки зрения экономичности процесса. Например, когда рассматривается безвредное для окружающей среды сжигание отходов углеобогащения, вопрос об экономической эффективности не ставится, поскольку применение псевдоожиженного слоя является единственным решением проблемы.

Известно, что чем меньше установки, тем выше для них удельные издержки. Так, котлоагрегаты с псевдоожиженным слоем для центрального теплоснабжения нельзя строить как угодно малыми. Где находится экономически оправданная граница мощности топочных устройств с псевдоожиженным слоем, пока еще не ясно, однако величины порядка 125 ГДж/ч, соответствующие расходу угля 5—7 т/ч, уже могут принести некоторую выгоду. Приведенные в [7] оценки показывают, что низкокалорийные угли, сжигаемые в котлоагрегатах с псевдоожиженным слоем мощностью 125 ГДж/ч с последующим обеспыливанием газов, более рентабельны по отношению к мазутным и слоевым топкам, причем экономичность процесса возрастает с уменьшением теплоты сгорания топлива. При

времени использования 3000 ч/год получено по сравнению с мазутной топкой равенство издержек при  $Q \sim 250$  МДж/кг, а со слоевой при  $Q \sim 290$  МДж/кг. Автор [7] делает вывод, что топка с псевдоожиженным слоем, доведенная до стадии пригодности к промышленному использованию, уже в настоящее время имеет экономические преимущества в данной области теплоты сгорания топлива.

К современным топливам, конкурирующим с углем, для мощных электростанций относятся природный газ и мазут, однако в будущем угольные электростанции необходимо сравнивать с атомными. В [7] указывается, что котлоагрегаты с псевдоожиженным слоем при нагрузке около 3500 ч/год конкурентоспособны по отношению к атомным электростанциям.

В [8] проведено экономическое сравнение вариантов ТЭС мощностью 500 Мвт: угольной, мазутной и с газотурбинной установкой (ГТУ) при сжигании угля в псевдоожиженном слое под давлением. С учетом предполагаемого роста цен на топливо ТЭС с псевдоожиженным слоем экономичнее эквивалентной обычной угольной или мазутной ТЭС. Отмечается перспективность реконструкции старых ТЭС с добавкой ГТУ со сжиганием топлива в псевдоожиженном слое.

Следует отметить, что использование техники псевдоожижения позволяет успешно решить проблему защиты окружающей среды от загрязнения выбросами теплоэнергетических установок прежде всего окислами азота и серы. Так, в настоящее время имеется несколько технологических решений, позволяющих полностью или частично извлекать серу до или после сжигания топлива на тепловых электростанциях: десульфуризация жидкого или твердого топлива, очистка дымовых газов от двуокиси серы или глубокая переработка топлива перед сжиганием (пиролиз и безостаточная газификация с очисткой газа от сероводорода). Однако ни одно из них полностью не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к идеальной газоочистке: высокая степень улавливания серы при различных нагрузках, широкая область применения, получение серы в виде пригодной для дальнейшего использования продукции, достаточно умеренные капитальные затраты и эксплуатационные расходы.

Таблица 1.

Сравнение различных способов обеспечения стандартов по выбросам  $\text{SO}_2$

Способ обеспечения допустимых выбросов в атмосферу	Относительная сложность процесса	Потери энергии на технологический процесс, %	Повышение себестоимости электроэнергии, $\times 10^{-4}$ долл/кВт·ч
Использование малосернистого топлива	1	0	4,6—6,0
Очистка дымовых газов	2—3	4—7	4,5—6,7
Газификация угля с получением высококалорийного газа	8—10	30	12
Получение жидкого топлива из угля	8—10	30	10
Сжигание угля в псевдоожиженном слое	5	2	2,5—5,7
Химическая очистка угля	4—5	10	4,0—5,5
Газификация угля с получением низкалорийного газа	7—10	20	7,0—10,0

Как видно из табл. 1, эффективным путем снижения выбросов двуокиси серы в атмосферу с дымовыми газами является совмещение процессов сжигания топлива и улавливания серы в одном устройстве, которым служит котлоагрегат с псевдоожиженным слоем серопоглощающих компонентов и работающий при температурах до 900—950 °С.

Измерения концентрации окислов азота в дымовых газах показали, что топки с псевдоожиженным слоем имеют существенные преимущества перед применяемым в современной теплоэнергетике оборудованием. Поскольку проблема очистки дымовых газов от окислов азота находится в начальной стадии разработки, то количественного сопоставления различных способов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  не проведено [9].

Широко изучается проблема использования отходов топочных устройств с псевдоожиженным слоем. Отработанный материал, представляющий собой смесь  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  и других веществ, позволяет получить быстротвердеющий строительный материал, пригодный, например для дорожного покрытия. Проводятся исследования по использованию отходов в технологии обработки кислотных сточных вод угольных шахт с целью их нейтрализации, а также как обезвоживающего агента при обработке шламов. По-



ложительные результаты получены при использовании отходов в сельском хозяйстве в качестве структурообразователя почвы и удобрения [10, 11].

Кроме того, проводятся обширные исследования по возможности регенерации отработанных материалов и их многократного использования.

#### 4. КОТЛОАГРЕГАТЫ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Первой промышленной установкой, на которой исследовался псевдоожиженный слой, был реконструированный в Англии водотрубный котел паропроизводительностью 20 т/ч. Во время его реконструкции была смонтирована распределительная решетка площадью 9,29 м<sup>2</sup> (рис. 5).

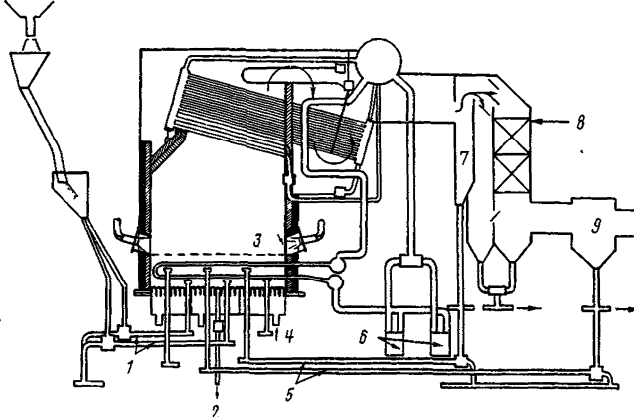


Рис. 5. Разрез котла с псевдоожиженным слоем производительностью 20 т/ч: 1—подача топлива; 2 — удаление золы; 3—мазутная горелка; 4—воздух; 5—дожигание горючих из уноса; 6—циркуляционный насос; 7 — улавливание крупных частиц уноса; 8 — экономайзер; 9— золоуловитель.

В слое размещены горизонтальные парогенерирующие трубы с принудительной циркуляцией котловой воды. Расчетная температура составляла 850—950 °С, около 50% тепла передавалось погруженным в слой трубам. Уголь, подсушенный и измельченный (95% менее 3 мм), подавался в бункер, расположенный над котлом, а затем при помощи пневматической системы топливоподачи поступал в слой. Сначала слой псевдоожижается холодным воздухом, а затем нагревается мазутными горелками, которые находятся над слоем и наклонены вниз. Когда температура в слое достигает температуры воспламенения (~500°С), начинается подача угля, потом отключаются мазутные горелки и для поддержания необходимой

высоты слоя зола удаляется через специальные трубы, вмонтированные в распределительную плиту. Воздушный короб под распределительной решеткой разделен на отсеки, что позволяет отключать отдельные участки слоя.

Во время опытов в топочном устройстве сжигался уголь с зольностью до 60%, теплотой сгорания до 2720 ккал/кг и с содержанием серы около 2%. При скорости псевдоожижения 1,38 м/с была достигнута производительность 10 т/ч с параметрами пара  $p=25,5$  кгс/см<sup>2</sup> и  $T=270^{\circ}\text{C}$ . Увеличение числа погруженных в слой парогенерирующих труб и скорости псевдоожижения до 2,43 м/с позволило повысить паропроизводительность до 20 т/ч.

Регулирование нагрузки на котле осуществлялось снижением температуры в слое или отключением его отдельных участков. Последний способ очень быстро снижал нагрузку, так как теплоотвод к погруженным трубам на отключенном участке слоя уменьшался почти мгновенно. Восстановление нагрузки происходило также быстро, поскольку отключенный участок слоя сохранял свое тепло. Диапазон регулирования нагрузки составлял 4:1. Снижение нагрузки изменением температуры в слое достигалось медленнее из-за большой аккумулирующей способности слоя инертного материала.

Экспериментально была подтверждена возможность успешного сжигания в псевдоожиженном слое угля, содержащего до 60% золы. Добавка известняка позволяла улавливать в топке до 90% серы. Измерение концентрации окислов азота в дымовых газах показало, что и в отношении этих вредных выбросов топки с псевдоожиженным слоем имеют преимущество перед обычными: при сжигании угля с содержанием азота 1,1% выбросы  $\text{NO}_x$  составляли только 400 мг/м<sup>3</sup>.

Эксплуатация котлоагрегата показала, что потери тепла с недожогом такие же, как и в механической топке с забрасывателем. Часть уноса может быть возвращена в топку для дожигания, хотя в топочном устройстве с псевдоожиженным слоем достаточно высокая степень выгорания топлива обеспечивается и без дожигания уноса.

Дальнейшее развитие технологии привело к созданию котлов с ЦКС единичной мощностью до 350 МВт (Таблица 2).

Технология ЦКС позволяет сжигать с высокой экономичностью широкую гамму твёрдого топлива с низкими требованиями к качеству топлива (не только угли, но и нефтяной кокс, торф, сланцы, различные виды биомассы), снижает выбросы загрязняющих веществ из котла. Технология ЦКС предполагает компактные размеры котельной установки, снижение стоимости строительства за счёт исключения систем серо-и азотоочистки.

**Таблица 2.**

**Крупнейшие котлы с ЦКС на повышенные параметры пара.  
(Информация ВТИ)**

Объект	Поставщик	Мощность блока, МВт	Расход пара, т/час	Давление пара, МПа	Температура пара, °С
Прованс, Франция	Альстом	250	700/	16,3/	567/563
Ред Хиллс, США	Альстом	2*250	753/	20,3/	568/541
Зульцис, Италия	Альстом	340	1013/836	19,7/	565/580
Шеннон-бридж, Ирландия	Фостер-Уиллер	159	407/354	17/3,48	563/563
Туров, Польша	Фостер-Уиллер	3*262	704/650	17/3,94	568/568
Логижа, Польша	Фостер-Уиллер	460	1300/1080	28,26/5,13	563/583

Российские производители котельного оборудования при взаимодействии с западными компаниями сталкиваются со следующими проблемами:

- иностранные производители не знакомы с условиями российского рынка;
- западные компании не готовы применять российские материалы, проектировать оборудование по российским стандартам;
- высокая стоимость оборудования по сравнению с отечественным.

Наиболее перспективными для сжигания в котлах с ЦКС топливами являются антрацитовый штыб (АШ), угли Печорского бассейна, тощие Кузнецкие угли, Подмосковные бурые угли, бурые угли Урала и Дальнего востока, а также отходы углеобогащения, торф, сланцы и биомасса. Хорошо сочетаются Кузнецкие каменные угли и угли Печорского бассейна, а также Экибастузские угли. Бурые угли лучше сжигаются с биомассой и торфом. Для малореакционных топлив (АШ и тощие угли) вполне допустимо совместное сжигание с отходами углеобогащения. Существенным преимуществом технологии ЦКС является возможность диверсификации поставок топлива. Примером может служить Черепецкая ГРЭС (рис. 6 и табл. 3)

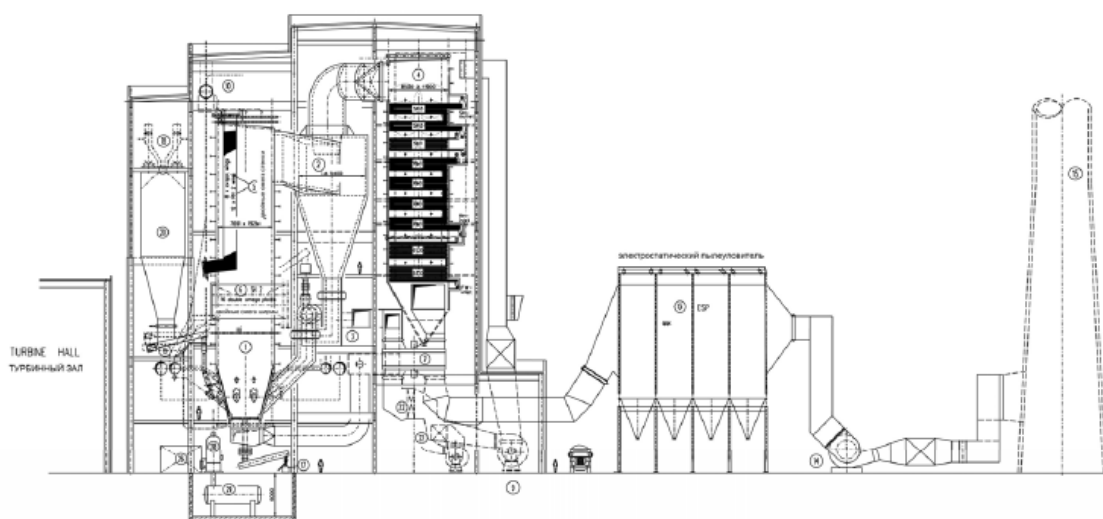


Рис. 6. Схема Черепетской ГРЭС 2\*225 МВт

**Таблица 3.**

Показатели топлив, используемых на Черепетской ГРЭС.

Топливо	Показатель				
	Wp, %	Ap, %	Sp, %	Vdaf, %	Qp н, ккал/кг
Кузнецкий уголь марки ДР	12,5	15,3	0,4	40,0	5110
Подмосковный уголь Б2 10 % в смеси с Кузнецким	31,0 32,4	1,9	55,0	1990	
Канско-Ачинский уголь (Ирша-Бородинский)	33,0	7,4	0,2	47,0	3650
Интинский уголь марки ДСШ (отсев)	11,8	27,8	2,6	37,4	4080

Расширение использования угля требует разработки и ввода в эксплуатацию на конкретных ТЭС угольных блоков мощностью 600–700 МВт на суперкритические параметры пара, блоков мощностью до 300 МВт с котлами ЦКС, эффективных установок очистки газов от золовых частиц, оксидов азота и серы.

Необходимы исследования, отработка процессов и создание оборудования для перспективных технологий сжигания углей: их газификации, гибридных установок с топливными элементами, улавливания CO<sub>2</sub> и его захоронения.

Так же в качестве топлива для ЦКС могут служить биомасса и твердые бытовые отходы. С экономической точки зрения работа котлов с ЦКС требует точных, достоверных знаний о биотопливе, для оптимизации сжигания. Успешный дизайн и работа топки с кипящим слоем требует контроля и решения проблем связанных со

спеканием золы. Взаимодействие компонентов золы с кварцевым песком создает образование агломератов с низкой точкой плавления. Традиционный способ снижения негативных эффектов от спекания слоя состоит в усилении дренажа слоя с добавлением свежего инертного материала. На практике необходимо определить нужный расход предотвращающий спекание.

Другим способом является увеличение скорости газа в слое. При этом необходимо определить коэффициенты ожижения, время полного смешения, требуемый расход первичного воздуха для предотвращения зон стагнации, как для материала загрузки слоя свежим песком, так и для агломератов. Недостаточное перемешивание внутри слоя приводит к увеличению разницы температур в слое. Для предотвращения агломерации требуется подача достаточного количества вторичного воздуха. Химические и физические характеристики материала слоя должны быть учтены для оптимальной работы котла с ЦКС. Исследования в этой области должны быть продолжены.

## **5. КОТЛОАГРЕГАТЫ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Известно, что газовые турбины требуют высококачественного топлива. Попытки использовать для них уголь оставались безуспешными из-за появления отложений солей щелочных металлов и абразивного действия золы на лопатки турбины. С развитием технологии низкотемпературного сжигания твердого топлива в псевдоожиженном слое стало возможным применение для газотурбинных установок (ГТУ) различных сортов углей. Это связано прежде всего с тем, что при сжигании топлива в псевдоожиженном слое в золе остается значительная часть солей щелочных металлов, а продукты сгорания после соответствующей очистки в двух трех последовательно включенных циклонах не вызывают эрозии и коррозии лопаток турбины.

Повышение давления в топке до 6—10 кгс/см<sup>2</sup> не только интенсифицирует процессы горения и теплообмена, но и расширяет возможности снижения выбросов окислов азота и серы.

Следует заметить, что для разработки и внедрения котлоагрегатов с псевдоожиженным слоем под давлением требуется больше времени, чем для топочных устройств атмосферного типа. Наибольшую сложность представляет очистка горячих газов от

твердых частиц до уровня, приемлемого для газовых турбин. Наряду с электрофильтрами для этого предлагается использовать циклоны и рукавные фильтры. Известные трудности возникают при вводе топлива и серопоглощающей присадки в топочную камеру и выводе шлаков и продуктов реакции присадки с двуокисью серы, а также создание крупной камеры сгорания применительно к энергетической установке большой единичной мощности.

Топки с псевдоожиженным слоем под давлением могут применяться на ТЭС в комбинированном цикле производства электроэнергии, который по сравнению с традиционным дает преимущество в эффективности использования угля и тепла с большими возможностями по обеспечению требований к защите окружающей среды. Термодинамический к. п. д. таких установок увеличивается с ростом температуры поступающих в газовую турбину газов и увеличением доли газотурбинной части в суммарной мощности установки.

Разработано несколько проектов установок различной мощности с парогазовым циклом. Предполагается, что 80% мощности будет вырабатываться паровой турбиной, а 20% — газовой [12].

В простом открытом газотурбинном цикле камера сгорания с псевдоожиженным слоем под давлением работает как контактный воздухоподогреватель. Часть воздуха после компрессора поступает для сжигания топлива, а остальная часть подмешивается к продуктам сгорания с целью поддержания определенной температуры стенок камеры и температуры горячего газа, подаваемого в газовую турбину. Возможны и другие конструктивные и схемные решения. На рис. 7 показана схема ТЭС с ГТУ, оснащенной топочным устройством с псевдоожиженным слоем под давлением. Особенностью данной схемы является подача  $1/3$  воздуха после компрессора для псевдоожижения слоя, в то время как остальные  $2/3$  поступают в змеевики, погруженные в слой. Благодаря этому значительно уменьшается количество газов, которые необходимо очищать от твердых частиц. Кроме того, такое решение позволяет использовать обычную газовую турбину с минимальной ее модернизацией. Температура газов на входе в турбину может поддерживаться на уровне  $900^{\circ}\text{C}$  изменением расхода топлива и отношением расходов воздуха через слой и погруженные в слой трубы. К. п. д. такой ТЭС с открытым циклом будет составлять 27%, однако при использовании тепла выхлопных газов ГТУ для технологических целей или отопления можно получить к.п. д. установки  $\sim 70\%$ .

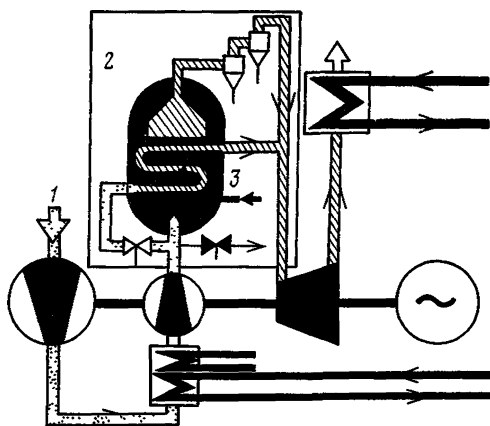


Рис. 7 Схема ТЭС с газотурбинной установкой: 1 — воздух; 2 — топка с псевдоожиженным слоем; 3 — топливо

Схема с применением камеры сгорания с псевдоожиженным слоем в ПГУ показана на рис. 8. В слой погружены два трубных пучка. В одном из них подогревается воздух, направляемый в газотурбинный тракт, в другом — в парогенератор, готовящий пар для паровой турбины. Требуемая тепловая мощность слоя в этом случае больше, поэтому доля суммарного расхода воздуха, подаваемая в камеру сгорания для ожигения и сжигания топлива, оказывается большей, чем в случае ГТУ. Тепло отработанных газов утилизируется в подогревателе питательной воды паротурбинной части цикла. Достижимая величина к. п. д. такого цикла находится на уровне 40%. Мощность парового цикла регулируется изменением параметров потока в дополнительном трубном пучке, а газового — подачей воздуха после компрессора, минуя камеру сгорания, сразу в газовую турбину. Следует отметить, что во вторичном контуре теплоносителем может быть углекислый газ или гелий.

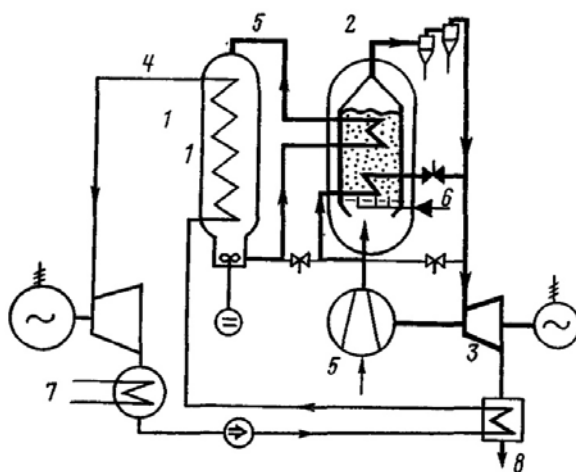


Рис. 8 Схема ТЭС с газотурбинной установкой: 1 — котел; 2 — топка с псевдоожиженным слоем; 3 — газовая турбина; 4 — пар; 5 — воздух; 6 — топливо; 7 — охлаждающая вода; 8 — в дымовую трубу

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что за рубежом и в нашей стране интерес к топочным устройствам с псевдоожиженным слоем постоянно растет, о чем свидетельствует значительное число появившихся в последние годы публикаций как по теоретическим и экспериментальным вопросам сжигания в псевдоожиженном слое, так и включающих в себя сведения о промышленных котлоагрегатах.

Сегодня существенное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу от ТЭС, в частности угольных, достигается при комбинированной выработке электроэнергии и тепла. В России она получила широкое развитие и по принятым оценкам снижает потребление топлива в стране на ~20 млн. т у.т. в год.

Вместе с тем для успешной реализации новой технологии получения электрической и тепловой энергии с использованием псевдоожиженного слоя в промышленном масштабе следует решить еще ряд вопросов, необходимых для проектирования котлоагрегатов, а также иметь обширную информацию о протекающих в псевдоожиженном слое процессах, прежде всего количественное описание закономерностей тепломассопереноса при горении и особенностей образования вредных выбросов. Эти вопросы наряду со многими другими, касающимися технической эксплуатации котлоагрегатов с псевдоожиженным слоем (пуск установки, длительность ее работы, коррозия и эрозия теплообменных поверхностей, раздача топлива и серопоглощающего материала и т. д.), изучаются на многочисленных установках опытно-промышленного масштаба, уже построенных и создаваемых во многих странах.

Следует заметить, что мощность сооружаемых установок обнаруживает явную тенденцию к своему росту: если 10 лет тому назад их тепловая мощность не превышала 1 МВт, то в настоящее время конструируются установки мощностью более 100 МВт. В связи с неизбежной заменой в ближайшие 10—20 лет природного газа и нефти как энергетического сырья на твердое топливо и прежде всего на низкокачественные угли вполне очевидна необходимость дальнейшего проведения значительного объема научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, которые позволят технике псевдоожиженного слоя найти широкое применение в теплоэнергетике.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. П. Вестник АН СССР, 1979, № 6, с. 9, 35.
2. Davidson S. F. Chem. Ind. Develop., 11, N 3, 1977, p. 43—45.
3. «Cooperation in the field of energy technologies: global challenges & concerted actions» 30.09— 1.10.2008, Moscow, Russia.
4. Аэров М. И., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем.— Л., 1968, 510 с.
5. Катализ в кипящем слое. Под ред. И. П. Мухленова и В. М. Померанцева.— Л., 1978, 232 с.
6. Забродский С. С. В кн.: «Тепло- и массоперенос», 3.— М.— Л., 1963, 633—640 с.
7. Петерс В. Глюкауф, 1978, 114, № 8, 5—16 с.
8. Schilling H. Chem. Ing. Tech., 51, N 3, 1979, s. 184—191.
9. Энергетика и охрана окружающей среды. Под ред. Н. Г. За- логи- на, Л. И. Кроппа и Ю. М. Кострикина.— М., 1979, 352 с.
10. Minnick L. Collins R. /. Proceedings Fluidiz. Bed Combust. Technol. Exchange Workshop, 2, 1977, p. 277—283.
11. Gasner L. L. Proceedings Fluidiz. Bed Combust. Technol. Exchange Workshop, 1977, 2, p. 285—299.
12. Harboe H., Moude C. W. Inst. Eng. Austral., Annu. Eng. Conf. 1976, Sidney, p. 350-354.

ЛЕКЦИИ  
Международной конференции с элементами научной школы

**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**

Проведена при финансовой поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований  
(грант РФФИ № 14-08-06024 Г\_2013).

---

---

**Издательство ИП Чеснокова А.В.  
392020, г. Тамбов, ул. О. Кошевого 14. Тел. (4752) 53-60-84.**

Подписано в печать 22.05.2014 г. Формат 60х84<sup>1</sup>/16.  
Объем – 7,5 усл. печ. л. Тираж 300 экз. Заказ № 210.