



Некоммерческое партнерство  
**«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической системы»**



Российская Академия Наук  
Секция по проблемам надёжности и  
безопасности больших систем  
энергетики Научного совета РАН по  
системным исследованиям в энергетике

---

**УТВЕРЖДАЮ**  
Президент НП «НТС ЕЭС»,  
д.т.н., профессор

**Н. Д. Роголёв**

### **ПРОТОКОЛ**

совместного заседания Научно-технической совета НП «НТС ЕЭС»  
и Секции по проблемам надёжности и безопасности больших систем  
энергетики Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике  
на тему:

**«Комплекс мероприятий, разработанный в рамках проекта  
модернизации газотурбинного двигателя ГТД-110»**

г. Москва

№ 1/20

21 июля 2020 г.

**Заседание проведено в режиме видеоконференции.**

В видеоконференции приняли участие: АО «Татэнерго», АО «Институт Гидропроект», НИУ «МЭИ», ЗАО «Интеравтоматика», АО «СО ЕЭС», ПАО «ОДК-Сатурн», ИСЭМ РАН, Группа компаний «ИнЭнерджи», ОАО «НПО ЦКТИ», ПН «Прорыв», НТЦ «ФСК ЕЭС», ПАО «Интер РАО», ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии», ООО «Газпром энергохолдинг», ОАО «ВТИ», АО «Институт «Теплоэлектропроект», Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Совет РАН по проблема развития энергетики, Научный совет РАН по комплексной проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика», ПАО «РусГидро», СКБ ГТУ, АО «Техническая инспекция ЕЭС».

**Заседание открыл** президент НП «НТС ЕЭС», ректор НИУ «МЭИ», д.т.н., профессор **Н. Д. Роголёв**.

В своём вступительном слове **Н.Д. Роголёв** отметил важность создания газовых турбин ГТЭ-110М для обеспечения модернизации электростанций и развития новых мощностей.

**Со вступительным словом** выступил д.т.н. **А. Я. Копсов** — президент компании ООО «К-Энерго». Ниже приведен текст вступительного слова.

Уважаемые коллеги! На сегодняшнее расширенное заседание, кроме членов Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике приглашены представители энергетических и энергомашиностроительных компаний, РАН, Минэнерго РФ, научно-исследовательских и образовательных институтов и организаций энергетического профиля.

Сегодня мы рассматриваем важный вопрос — модернизацию газотурбинных двигателей ГТД-110, выпускаемых ПАО «ОДК-Сатурн» и установленных на Ивановских ПГУ АО «Интер РАО – Электрогенерация» и на Рязанской ГРЭС-24 ООО «Газпром энергохолдинг».

В процессе эксплуатации на этих электростанциях, на газотурбинном оборудовании выявилось значительное количество недостатков и узких мест, которые отрицательно сказывались на работе ПГУ.

По инициативе ПАО «Интер РАО», УК «РОСНАНО» и ПАО «ОДК-Сатурн» была осуществлена глубокая модернизация двигателя, и сегодня на совместном заседании Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики Научного совета РАН будут рассмотрены результаты этой работы.

К реализации проекта были привлечены, кроме названных выше компаний, предприятия и институты, специализирующиеся в области газотурбостроения, такие как ОАО «ВТИ», НПО «ЦНИИТМАШ», ОАО «НПО ЦКТИ», ЦИАМ им. П.И. Баранова, ЗАО «Интеравтоматика» и другие научные и специализированные организации.

Одновременно хотел бы подчеркнуть значительный вклад в проект модернизации ГТД-110 специалистов по газовым турбинам: **В.В. Романова, А.Н. Климова, В.В. Бушманова, Ю.Н. Шмотина, А.С. Иванова, М.Р. Гасуль, Г.Г. Ольховского, В.А. Биленко, В.Е. Михайлова, А.Д. Трухний, С.В. Куликова** и других российских учёных, энергетиков и энергомашиностроителей.

В настоящее время модернизированный двигатель ГТД-110М российского производства прошёл все регламентные испытания и успешно работает в составе второго энергоблока Ивановских ПГУ. Нарботка на сегодняшний день составляет более 5 тысяч эквивалентных часов.

Надеюсь, что сегодняшнее обсуждение пройдет традиционно в конструктивном виде и будет способствовать ускорению внедрения отечественного двигателя ГТД-110М в серийное производство.

С докладом «**О модернизации газотурбинного двигателя ГТД-110М**» выступил **А. Н. Климов** — главный конструктор ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии» (доклад подготовлен совместно с **В. В. Романовым** —

техническим директором ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии» и С. М. Скирта — главным специалистом ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии»).

В докладе отмечено, что направления по развитию конструкции, обеспечению надёжности и повышению эксплуатационных показателей ГТД-110 были определены по результатам работы экспертной комиссии, которая была организована по инициативе ПАО «Интер РАО», ОАО «РОСНАНО», ОАО «УК «ОДК».

Для реализации проекта ГТД-110М группой компаний был создан инжиниринговый центр ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии», задачей которого была модернизация двигателя ГТД-110 в целях повышения надёжности его работы и увеличения паркового ресурса, а также доведения технических характеристик до уровня зарубежных аналогов газотурбинных двигателей в данном классе мощности.

Работа по проекту началась в середине 2014 г. Основными направлениями были устранение недостатков, дефектов и замечаний, выявленных в процессе опытной и промышленной эксплуатации. Работы проводились с привлечением наиболее компетентных в области газотурбостроения предприятий и институтов ПАО «ОДК-Сатурн», ОАО «НПО ЦКТИ», ОАО «ВТИ», ОАО «ЦНИИТМАШ», ПАО «Кузнецов», ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, ООО «ТСЗП», ЗАО ТД «Галион», ООО «Альфа-Транзит».

В ходе выполнения проекта разработан ряд технологических и конструктивных мероприятий, позволяющих устранить ранее выявленные проблемы и обеспечить требуемые показатели надёжности. Все модернизированные узлы, аппараты и детали прошли испытания и проверку эффективности на стендах ПАО «ОДК-Сатурн», ОАО «НПО ЦКТИ», ОАО «ВТИ» и в составе опытного двигателя ГТД-110 заводской № 2, а затем внедрены на серийный двигатель ГТД-110 заводской № 6, находящийся в опытно-промышленной эксплуатации в ячейке второго энергоблока Ивановских ПГУ.

Наиболее важными с точки зрения обеспечения ресурса являются мероприятия по рабочей лопатке первой ступени турбины и штатной камере сгорания. Конструктивные и технологические мероприятия разрабатывались с учётом возможности параллельной проверки и обеспечения опережающей наработки на серийных двигателях в ячейках энергоблоков Ивановских ПГУ.

Кроме мероприятий по рабочей лопатке первой ступени турбины, проведена оптимизация теплового состояния сопловых аппаратов турбины, изменено количество сопловых аппаратов первой и второй ступеней для снижения динамического воздействия на рабочие лопатки, разработаны составы и технология нанесения термобарьерных и износостойких наноструктурированных покрытий, выполнена доработка трубопроводов обвязки воздухоохладителей.

Целый ряд работ проведён по моделированию, верификации и оптимизации вибрационного состояния системы роторов. На основании

расчётно-исследовательских и опытных работ разработана конструкция и выпущена документация на модернизированные узлы.

Значимой частью проекта была разработка малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС) на уровень вредных выбросов NO<sub>x</sub> 25 ppm в диапазоне 50 – 100 % номинальной мощности турбины. По результатам проекта проведены испытания при полных и частичных нагрузках, выпущена конструкторская документация и изготовлен комплект МЭКС для подтверждения заданных характеристик в составе двигателя ГТД-110М. Для проведения испытаний в составе двигателя подготовлены обновленные алгоритмы САУ и дополнительные системы розжига, контроля пульсаций и эмиссии.

Помимо газовой турбины проведены мероприятия по улучшению эксплуатационных показателей систем ГТЭ-110. Усовершенствованы тепло- и звукоизоляция, снижены гидравлические потери во входном тракте ГТД. Разработаны и внедрены мероприятия по устранению вибрации выхлопного газотока.

Отдельным этапом реализации проекта являются испытания основных деталей и узлов на восстановленном и модернизированном опытном двигателе ГТД-110М заводской № 2.

Выполнено пять этапов испытаний, в ходе которых проведены термо- и тензометрирование рабочих лопаток и дисков 1 – 4 ступеней турбины, термометрирование деталей статора турбины и деталей камеры сгорания.

Также в рамках проекта модернизирован двигатель ГТД-110 заводской № 6 в облик ГТД-110М, проведены успешные длительные испытания двигателя на испытательном стенде Ивановских ПГУ по утверждённой программе.

По результатам длительных испытаний и оценки технического состояния при эндоскопическом осмотре основных деталей и узлов с частичной разборкой, двигатель допущен к опытно-промышленной эксплуатации в ячейке второго энергоблока Ивановских ПГУ по диспетчерскому графику.

В настоящее время двигатель находится в режиме подконтрольной опытно-промышленной эксплуатации в условиях конкурентного рынка электрической энергии и мощности. Суммарная текущая наработка двигателя составляет более 5 100 эквивалентных часов.

Таким образом, в результате выполнения проекта создан первый отечественный газотурбинный двигатель большой мощности с характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам.

С докладом «**Развитие проекта ГТД-110М**» выступил **В. В. Бушманов** — и. о. заместителя генерального конструктора – главного конструктора по ГТД-110.

Докладчик отметил, что двигатель ГТД-110М создан на базе ГТД-110 и предназначен для работы в простом цикле и в цикле ПГУ. Первый опытный образец ГТД-110 был изготовлен в ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» в 1997 г., в 2001 г. был изготовлен ГТД-110 № 2. В декабре 2003 г. успешно проведены МВИ на стенде Ивановских ПГУ. С 2004 по 2007 гг. в ПАО «ОДК-Сатурн»

освоено производство и изготовлены двигатели № 3 и № 4. С 2010 по 2012 гг. были изготовлены ГТД-110 №№ 5 – 7.

В начальный период эксплуатации двигателей ГТД-110 был выявлен ряд дефектов, которые потребовали проведения дополнительных расчётных и экспериментальных исследований для их устранения. После подготовки предварительного технико-экономического обоснования, подписания инвестиционного соглашения о создании ГТД-110М между ФИОП «Роснано», ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «Интер РАО», НП «ЦИЭТ» при участии УК «РОСНАНО», ОАО «НПО ЦКТИ», ОАО «ВТИ», ОАО «ЦНИИТМАШ», ФГУП «ЦИАМ им. П.А. Баранова» и поддержке Министерства промышленности и торговли РФ и учреждения ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии» был выполнен значительный объём опытно-конструкторских работ, аналогичный созданию нового двигателя, в частности, количество вновь разработанной конструкторской документации составило 33 890 форматов А4, 3 862 математических моделей, оформлено 462 технических отчёта по результатам расчётов и испытаний узлов и деталей двигателя. Были изготовлены опытные образцы рабочих и сопловых лопаток турбины, жаровых труб, газосборников, блоков форсунок и других деталей, выполнена препарация, поузловая доводка деталей в составе стендовых установок и испытания в составе препарированных двигателей ГТД-110 № 2 и ГТД-110 № 6 на испытательном стенде Ивановских ПГУ. С 24.06.2019 г. ГТД-110 № 6 с внедрёнными мероприятиями по проекту создания ГТД-110М проходит опытно-промышленную эксплуатацию в составе блока № 2 Ивановских ПГУ.

Также при выполнении работ создана 3D динамическая модель двигателя на раме для оценки критических частот вращения системы роторов с учётом податливости опор и корпусов. Выполнен анализ прочности и ресурса роторов компрессора и турбины по 2D и 3D моделям, разработаны 3D расчётные модели сопряженного теплообмена рабочего колеса первой ступени турбины и рабочего колеса второй ступени турбины с учётом смежных полостей.

Полученный опыт был использован при разработке расчётной модели сопряженного теплообмена соплового аппарата первой ступени турбины с учётом смежных полостей. Выполнена оценка теплового состояния с учётом неравномерности температурного поля за камерой сгорания. Расчётные модели были верифицированы по результатам серии испытаний препарированного ГТД-110 № 2.

Выполнены нестационарные расчёты амплитудно-частотных характеристик газового потока в рабочем колесе первой ступени турбины, по результатам которых принято решение об изменении количества сопловых лопаток 1-ой и 2-ой ступеней турбины.

Выполнено моделирование процессов смешения в камере сгорания, выполнен ряд расчётов сопряженного теплообмена в камере сгорания.

Выполнен комплекс расчётов малоэмиссионной камеры сгорания, разработана конструкторская документация, изготовлены опытные образцы и

выполнена серия испытаний на стендах ОАО «ВТИ» и ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

Изготовлен комплект жаровых труб и горелочных устройств для испытаний в составе двигателя. Выполнена доработка топливного оборудования испытательного стенда Ивановских ПГУ.

Необходимо проведение комплекса испытаний ГТД-110М в составе двигателя с последующей постановкой (внедрением) малоэмиссионной камеры сгорания на серийные образцы двигателей данного типа.

По состоянию на 21.07.2020 г. наработка ГТД-110М № 6 с внедрёнными мероприятиями по проекту ГТД-110М в составе испытательного стенда и блока № 2 Ивановских ПГУ составила 5166 эквивалентных часов. Параметры двигателя соответствуют техническим условиям R10009500ТУ.

Опыт эксплуатации показал необходимость разработки норм повреждаемости для оценки технического состояния лопаточного аппарата компрессора двигателя в условиях эксплуатации с целью принятия решения о продолжении эксплуатации двигателей при выполнении технического обслуживания.

Также отмечено, что до 2021 г. будут завершены работы по импортозамещению комплектующих изделий (теплообменников, сильфонных компенсаторов, каналов измерения пульсаций давления в полости камеры сгорания).

С целью накопления информации и создания системы прогнозирования предотказного состояния разрабатывается система удалённого мониторинга параметров двигателя в эксплуатации.

По результатам реализации проекта создания ГТД-110М следует отметить:

- ПАО «ОДК-Сатурн» совместно с ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии», ПАО «Итер РАО», УК «РОСНАНО» при финансовой поддержке Минпромторга РФ с участием ведущих научных и производственных организаций ОАО «ВТИ», ОАО «НПО ЦКТИ», ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», ООО «ТСЗП» выполнен значительный объём работ по исследованию и доводке газотурбинного двигателя ГТД-110, в результате чего создан ГТД-110М с улучшенными техническими характеристиками;

- ГТД-110М производства ПАО «ОДК-Сатурн» соответствует постановлению Правительства РФ от 17.07.2015 г. № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации»;

- с целью развития проекта ГТД-110М, улучшения потребительских свойств двигателя необходимо продолжить работы по внедрению малоэмиссионной камеры сгорания на серийных образцах, а также по созданию норм повреждаемости, импортозамещению и внедрению удалённого мониторинга параметров в эксплуатации.

**С экспертным заключением** выступил **М. С. Золотогоров** — главный специалист ОАО «НПО ЦКТИ».

ГТД-110М — единственная отечественная энергетическая ГТУ, которая спроектирована без использования лицензий ведущих в области газотурбостроения зарубежных фирм и выпускается в настоящее время отечественным предприятием.

Двигатель представляет собой одновальный агрегат простого термодинамического цикла для непосредственного привода электрического генератора.

Установка ГТД-110М при мощности 115 МВт имеет чрезвычайно малый отгрузочный вес около 60 т. Сравнимый показатель в мире среди агрегатов средней и большой мощности отсутствует. Достигнут такой уникальный весовой показатель за счёт применения конструктивных решений, свойственных газотурбинным двигателям авиационного и морского назначения.

Работы по модернизации ГТД-110 были начаты в 2014 г. Для их реализации (совместно с изготовителем — ПАО «ОДК-Сатурн») был образован ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии». В работах по модернизации ГТД-110 приняли участие наиболее компетентные в области газотурбостроения организации: ФГУП ЦИАМ им. П.А. Баранова, ОАО «ВТИ», ОАО «ЦНИТМАШ» и ОАО «НПО ЦКТИ».

Состав проекта модернизации, т.е. перечень элементов и узлов, подлежащий модернизации, был определён практическим опытом эксплуатации шести агрегатов ГТД-110, установленных на двух электростанциях: Ивановские ПГУ и Рязанская ГРЭС. Эксплуатация этих агрегатов после проведённого в 2003 г. МВИ была регулярно связана с нештатными ситуациями. Таким образом был выявлен ряд основных недостатков (дефекты рабочих лопаток турбины, камеры сгорания и внешней обвязки).

Поэтому первостепенной задачей модернизации агрегата являлось обеспечение ресурса наиболее напряжённых деталей турбины (рабочие лопатки и камера сгорания) для достижения межремонтного ресурса не менее 25 000 эквивалентных часов с плановыми периодическими инспекциями и полного назначенного ресурса не менее 100 000 эквивалентных часов.

Выполненные в ходе проекта модернизации работы можно укрупненно разделить на следующие группы:

- устранение дефекта рабочей лопатки 1-ой ступени турбины;
- повышение эксплуатационных показателей двигателя и установки в целом, в том числе снижение тепловыделений в укрытии ГТД, оптимизация шумовых характеристик в машинном зале ПГУ, снижение потерь давления во входном тракте ГТУ, повышение надёжности работы обвязки трубопроводов системы охлаждения;
- оптимизация вибрационного состояния роторной системы ГТД – трансмиссия – генератор и выходного диффузора ГТД;
- устранение дефектов штатной камеры сгорания для обеспечения ресурсных показателей;
- создание малоэмиссионной камеры сгорания.

ОАО «НПО ЦКТИ» принимало непосредственное участие в выполнении первых трёх групп работ и в обсуждении работ по камерной тематике.

*Устранение дефектов по рабочей лопатке 1-ой ступени турбины*

Одним из наиболее существенных дефектов, отмечавшихся при эксплуатации двигателя ГТД-110, являлся обрыв рабочей лопатки 1-ой ступени турбины по замковому соединению. По результатам исследований фрагментов разрушившихся лопаток, проведённых ведущими институтами, в том числе ОАО «НПО ЦКТИ», выявлено, что разрушение носит усталостный характер. Зоной зарождения трещины является галтель над средним или над верхним зубом (со стороны входной кромки и спинки по диагонали острого угла).

Расчётами ОАО «НПО ЦКТИ» было впервые показано, что разрушения происходят по 2-ой форме колебаний. Кроме того, в работах ОАО «НПО ЦКТИ» было указано на возможность возникновения резонансных режимов на 40 и 48 гармониках, что соответствует количеству лопаток сопловых аппаратов 1-ой и 2-ой ступеней соответственно и на исключительно малую величину относительного осевого зазора между сопловым аппаратом и рабочей лопаткой 1-ой ступени. Была определена высокая термонапряжённость трактовой полки (со стороны входной кромки) и неоптимальная схема охлаждения рабочей лопатки.

Кроме того, рядом организаций было указано на возможность снижения работоспособности лопатки из-за:

- особенностей конструкции рабочей лопатки 1-ой ступени турбины, заложенных при проектировании (массивная жёсткая ножка, составляющая до 50 % массы лопатки, узкая замковая часть и др.);
- длительного запуска двигателя до режима «холостой ход», что увеличивает время нахождения на резонансных режимах;
- неравномерного распределения напряжений в замковом соединении, что обусловлено значительной разницей в коэффициенте теплового расширения материалов рабочей лопатки и диска.

С учётом рекомендаций ОАО «НПО ЦКТИ» были разработаны конструктивные и технологические мероприятия, направленные на устранение дефекта и обеспечение ресурса рабочей лопатки 1-ой ступени турбины:

- в конструкцию внедрён демпфер;
- оптимизирована схема охлаждения;
- изменено количество лопаток сопловых аппаратов 1-ой и 2-ой ступеней;
- сопловой аппарат 1-ой ступени смещен в сторону камеры сгорания.

Кроме того, были выполнены следующие дополнительные мероприятия:

- изменена конструкция ножки замка;
- увеличена ширина замка;
- изменена конструкция реборды;
- выполнена подрезка выходной кромки рабочей лопатки;

- внедрена разношаговость в замковом соединении;
- выполнена разнонаправленная подрезка выходной кромки соплового аппарата 1-ой ступени;
- оптимизирован химический состав сплава ЧС88У-ВИ (в пределах паспорта на сплав), режимы литья и термообработки;
- применено наноструктурированное термобарьерное покрытие.

Все указанные мероприятия внедрены в серийный облик ресурсной рабочей лопатки двигателя ГТД-110М.

*Повышение эксплуатационных показателей двигателя и установки в целом*

По рекомендациям ОАО «НПО ЦКТИ» и с участием ОАО «НПО ЦКТИ» выполнены следующие мероприятия:

- для снижения потерь давления на входе в двигатель разработаны и внедрены мероприятия по воздуховодам и входной улитке (разделительное ребро), что позволило выровнять поле давлений на входе в двигатель и повысить КПД (абсолютный) установки на 1 %;
- определены основные источники шума и проведены замеры в зонах их размещения. На завершающем этапе работ в конструкцию ГТЭ внедрены разработанные мероприятия и повторно проведены замеры для оценки эффективности. Комплекс разработанных мероприятий позволил снизить уровни шума до требуемых значений;
- улучшены эксплуатационные показатели двигателя в части снижения теплового излучения от двигателя во внутреннее пространство укрытия, в рамках которого проведено термометрирование корпусов двигателя. Разработана документация, изготовлены теплоизолирующие легкоъемные кожуха, которые подтвердили свою эффективность при проведении испытаний на двигателе;
- проведены исследования возмущений воздушного потока в модели натурного выхлопного тракта и вибрационного состояния опорных конструкций с последующим анализом и разработкой конструктивных мероприятий.

Мероприятия, направленные на увеличение жёсткости опорных конструкций, позволили более чем в два раза снизить уровень вибраций газохода и довести их до нормируемых значений.

Мероприятия по изменению конструкции опорного венца турбины (количество стоек и форма обтекателей), направленные на устранение источника пульсаций, позволили снизить пульсации давления в три раза, а уровни виброскорости по газоходу в 2,5 раза.

Кроме того, ПАО «ОДК-Сатурн» были устранены дефекты внешней обвязки (трещины трубопроводов, обрыв кронштейнов, разрушение сильфонных компенсаторов и т.д.).

Работы по устранению дефектов по штатной (ресурсной) камере сгорания включали в себя большое число конструктивных изменений, внедрённых в натуральный двигатель. Эти работы обсуждены и одобрены на заседании НТС № 9 ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии».

ОАО «ВТИ» выполнена разработка малоэмиссионной камеры горения, в том числе ПАО «ОДК-Сатурн» изготовлен комплект жаровых труб для натурального двигателя. Эти работы обсуждены и одобрены на заседании НТС ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии» 04.12.2019 г.

Заключительными этапами реализации проекта модернизации являются следующие испытания двигателя.

1. Испытания на стенде АО «Стенд» восстановленного и модернизированного двигателя ГТД-110 заводской № 2. Выполнены пять этапов испытаний, в ходе которых проведены термо- и тензометрирование рабочих лопаток и дисков 1 – 4 ступеней турбины, термометрирование деталей статора турбины и деталей камеры сгорания.

2. Испытания на стенде АО «Стенд» и в ячейке штатного блока ПГУ-325 № 2 модернизированного двигателя ГТД-110 заводской № 6. В настоящее время этот двигатель с комплексом внедрённых мероприятий успешно эксплуатируется. На 21.07.2020 г. суммарная наработка составляет 5166 эквивалентных часов (при количестве пусков 81).

#### *Заключение*

По результатам анализа представленных материалов, с учётом выполненных ОАО «НПО ЦКТИ» работ сделаны следующие выводы.

1. Результаты работ по проекту создания газотурбинного двигателя ГТД-110М, представленные для экспертной оценки, свидетельствуют о глубоком понимании авторским коллективом выявленных в ходе опытной эксплуатации проблем.

2. Представленные материалы свидетельствуют о грамотной и полной постановке расчётных, экспериментальных и конструкторско-технологических работ, а показанные результаты свидетельствуют также о глубокой проработке всех внедрённых в серийную конструкцию мероприятий и решений.

3. Комплекс мероприятий, разработанный в ходе проекта и внедрённый в серийный двигатель ГТД-110М, прошёл проверку эффективности и работоспособности в ходе нескольких этапов испытаний, в том числе в условиях опытно-промышленной эксплуатации в ячейке штатного блока Ивановских ПГУ.

4. На основании анализа представленных материалов о положительных результатах длительных испытаний модернизированного агрегата ГТД-110М следует считать проведённую работу по модернизации агрегата эффективной и ведущей к достижению поставленных целей. Необходимо продолжить следующие работы по усовершенствованию агрегата:

- ПАО «ОДК-Сатурн» разработал конструкторскую документацию на оптимизированный диск 3-ей ступени турбины. Этот вариант в основном соответствует результатам расчётов, ранее выданных ОАО «НПО ЦКТИ». Считаю необходимым рекомендовать этот вариант диска для использования во всех вновь изготавливаемых агрегатах ГТД-110М;

- продолжить работы по оптимизации систем охлаждения, в частности, корневой и периферийной полок соловой лопатки 1-ой ступени (хотя бы в расчётном плане).

5. В свое время ОАО «НПО ЦКТИ» признал возможным применение при проектировании энергетических установок Норм прочности, разработанных ЦНИИ им. Крылова (одобрено Заключением ОАО «НПО ЦКТИ»). Однако полученный, в том числе при разработке и эксплуатации ГТД-110, опыт показал необходимость разработки стандартов оценки прочности, повреждаемости и надёжности для энергетических установок.

С сообщением «Создание двигателя ГТД-110М» выступил **Г. Г. Ольховский** — член-корр. РАН, президент ООАО «ВТИ», председатель секции «Тепловые электростанции» НП «НТС ЕЭС». Ниже изложены основные положения выступления.

В настоящее время на отечественных ТЭЦ установлено около 60 ГВт энергоустановок с докритическими параметрами пара, из них 8 ГВт — на давлении 9 МПа и температуру 510 – 540 °С. Возраст большей части из них превысит к 2025 г. 55 лет.

Энергетическое оборудование не отвечает современным требованиям по тепловой экономичности, манёвренности, автоматизации, воздействию на окружающую среду, ремонтным затратам. Экономика страны несёт большие потери из-за перерасхода топлива. На таком оборудовании модернизировать энергетику нельзя.

Действующие в нашей стране энергетические рынки не создают стимулов для разработки новых технологий и оборудования. Для рынка модернизации решающим фактором является её минимальная цена. Это всегда означает использование технологически старых, уже давно освоенных конструкций и технологий.

Для модернизации отрасли нужны турбины мощностью 25, 65, 110 и 160 (или 170 МВт), которые находятся в той или иной мере разработки и освоения. России нужно расширить линейку с повышением мощностей газовых турбин и со 100 % локализацией производства в России. Необходимо создать сертифицированное производство турбинных лопаток для ремонта уже имеющихся и оснащения перспективных ГТУ с намерением поставлять лопатки мировым производителям ГТУ.

Важной задачей, которую необходимо решить в составе ДПМ-2, является модернизация ТЭЦ. Именно газовые турбины мощностью 65, 110, 160 (170) МВт могут быть использованы для масштабной модернизации ТЭЦ. Необходимо правительственное решение о техническом перевооружении ТЭЦ с использованием парогазовых установок там, где они работают на природном газе. Важно сформировать заказ со стороны потребителей ГТУ-110М, обеспечивающий производство не менее 10 – 15 машин в год.

Газотурбинной установке ГТЭ-110 не повезло. Вначале она была спроектирована НПО «Машпроект» в г. Николаеве (Украина). Головной образец был изготовлен и испытывался также НПО «Машпроект» на своём

стенде, а все последующие ГТУ выпускались уже в России ОАО «НПО Сатурн» в г. Рыбинске, для которого эта была лицензионная продукция.

Возникавшие трудности рассматривались без участия разработчика и не получали должной технической оценки. Лишь несколько лет назад, после соглашения ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «Интер РАО» и УК «РОСНАНО» были созданы нормальные условия для доводки ГТУ, проведён необходимый объём исследований и разработаны изменения конструкции, устранившие причины неполадок. В настоящее время двигатель, на котором выполнены эти изменения, прошёл длительные испытания.

Важный вопрос, не получивший пока решения, — это установка на двигатель и испытания комплекта малоэмиссионных жаровых труб камеры сгорания, полностью изготовленных и отработанных на стенде.

Другой важный вопрос — это организация серийного производства ГТД-110М в количестве, обеспечивающем потребности модернизации ТЭЦ и новое строительство генерации.

#### **В обсуждении докладов приняли участие**

Член-корр. РАН **Г. Г. Ольховский** — президент ОАО «ВТИ», д.т.н., профессор **Н. Д. Роголёв** — ректор НИУ «МЭИ», президент НП «НТС ЕЭС», д.т.н. **А. Я. Копсов** — президент компании ООО «К-Энерго», д.т.н. **В. А. Биленко** — технический директор ЗАО «Интеравтоматика», д.т.н., профессор **В. Г. Грибин** — заведующий кафедрой паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ», **В. В. Бушманов** — и. о. заместителя генерального конструктора — главного конструктора по ГТЭ-110 ПАО «ОДК-Сатурн», **М. С. Золотогоров** — главный специалист ОАО «НПО ЦКТИ», д.т.н., профессор **В. Е. Михайлов** — генеральный директор ОАО «НПО ЦКТИ», д.т.н., профессор **Ю. А. Радин** — ОАО «ВТИ», к.т.н. **Р. М. Хазиахметов** — АО «Техническая инспекция ЕЭС», **С. В. Куликов** — главный инженер-технический директор Филиала «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО – Электрогенерация», к.т.н. **Ю. П. Гусев** — заведующий кафедрой электрических станций НИУ «МЭИ», **А. С. Иванов** — начальник отдела продаж энергетических ГТД ПАО «ОДК-Сатурн» и др.

**Комментарий** д.т.н. **В. А. Биленко** — технического директора ЗАО «Интеравтоматика», председателя секции АСУ ТП НП «НТС ЕЭС».

Весь цикл испытаний двигателей ГТД-110М — как опытного двигателя ГТД-110М, заводской № 2 на испытательном стенде, так и находящегося в опытно-промышленной эксплуатации в ячейке блока ПГУ серийного двигателя ГТД-110М, заводской № 6 — обязательно сопровождался включением в работу всего необходимого объёма технологической автоматики: защиты, блокировки, регуляторов, сигнализации и т.д.

При проведении работ по модернизации газотурбинного двигателя ГТД-110М и доведении его технических характеристик и показателей надёжности работы до уровня, удовлетворяющего требованиям рынка электрической энергии и мощности Российской Федерации, затруднений со стороны автоматики не было, несмотря на длительный срок службы оборудования ПТК стенда. В процессе работ возникала необходимость внесения изменений в

САУ ГТД, которые были реализованы в АСУ ТП стенда, а затем перенесены в АСУ ТП энергоблока № 2.

В соответствии с технологическим заданием ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии» и ОАО «ВТИ» ЗАО «Интеравтоматика» разработало и реализовало в САУ стенда алгоритмы управления ГТД-110М с малоэмиссионной камерой сгорания с учётом доработанной схемы распределения топливного газа.

В целях локализации производства ГТД-110М в России целесообразно все дальнейшие образцы газотурбинной техники автоматизировать только на российском оборудовании.

ЗАО «Интеравтоматика» подтверждает возможность автоматизации ГТД на аппаратуре отечественного производства с соблюдением всех требований завода-изготовителя и с учётом имеющегося опыта, накопленного в рамках работ по внедрению на российском рынке ряда ПГУ с газовыми турбинами иностранных производителей.

**Комментарий** д.т.н., профессора **В. Е. Михайлова** — генерального директора ОАО «НПО ЦКТИ».

Усовершенствованная конструкция газотурбинных двигателей ГТД-110М является очень хорошей. Целесообразно расширять производство ГТД-110М.

**Комментарий** д.т.н., профессора **В. Г. Грибина** — заведующего кафедрой паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ».

Необходимо отметить, что проводимые работы имеют важное значение для обеспечения энергобезопасности РФ и развития отечественных газотурбинных технологий для выработки электроэнергии.

В презентациях и заключении эксперта представлены данные по разработке и внедрению комплекса мероприятий по модернизации, которые заслуживают высокой оценки, но недостаточно отражены результаты контроля рабочих параметров, полученные в процессе опытно-промышленной эксплуатации двигателя.

Необходимо провести анализ эффективности работ по снижению аэродинамических потерь в проточной части установки: входной, выходной патрубки, лопаточный аппарат. Указанный анализ необходим как для оценки полученных результатов, так и для возможностей дальнейшего повышения эффективности двигателя.

Целесообразно продолжить опытно-промышленную эксплуатацию модернизированного двигателя ГТД-110. Учитывая большое число пусков в наработке 2 500 и 4 850 эквивалентных часов, наличие незначительных повреждений лопаточного аппарата компрессора и защитного покрытия сопловых лопаток первой ступени следует рассмотреть на Научно-технической совете НП «НТС ЕЭС» техническое состояние двигателя по результатам эксплуатации и дефектации после 6 500 часов работы.

**Комментарий** **А. С. Иванова** — начальника отдела продаж энергетических ГТД ПАО «ОДК-Сатурн».

В настоящее время разработан бизнес-план выпуска ГТД-110М. Предприятие ПАО «ОДК-Сатурн» готово выпускать 4 турбины в год.

**Комментарий** член-корр. РАН, президента ООАО «ВТИ» **Г. Г. Ольховского**.

Количество таких турбин для модернизации электростанций очень велико. Так, в работе, выполненной в ОАО «ВТИ» в 2015 г. к.т.н. **В. В. Нечаевым**, установлен перечень конкретных ТЭЦ, на которых может быть применено более 100 таких ГТУ.

Если переводить стоимость отечественных газовых турбин в долл. США не по курсу продажи нефти, а по паритету покупательной способности (что более правильно), то стоимость отечественных турбин будет не выше зарубежных.

**С заключительным словом** выступил д.т.н. **А. Я. Копсов** — президент компании ООО «К-Энерго».

Уважаемые коллеги, мне понравилось сегодняшнее обсуждение результатов работы модернизации газотурбинного двигателя ГТД-110М, оно прошло активно несмотря на то, что проходило в режиме видеоконференции.

Было высказано большое количество мнений и конкретных предложений по различным аспектам Проекта. Подавляющее число участников выступило с одобрением проведённой работы и мнениями по ускорению запуска отечественного двигателя ГТД-110М в серийное производство.

Сегодняшняя обстановка показывает необходимость ускоренной организации производства отечественных газовых турбин большой мощности в стране для импортозамещения этого оборудования, и для этого имеются положительные предпосылки.

Давайте вспомним, что после московской аварии в мае 2005 г. оперативно, в течении двух лет, ОАО «Силловые машины» изготовили для московских электростанций 6 газовых турбин ГТЭ-160, три паровые турбины и 9 генераторов.

Сегодня три ПГУ-450 с этим оборудованием успешно эксплуатируются на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27 в Мосэнерго, на которых около 90 % установлено оборудование, изготовленное в России.

В 2007 году ОАО «Силловые машины» изготовили газовую турбину ГТЭ-65, и она была установлена на Московской ТЭЦ-9. К сожалению, в силу различных причин, эта турбина не была доведена до нормального эксплуатационного состояния.

К чему я это говорю: сегодня у российских энергомашиностроительных компаний, в частности, у ПАО «ОДК-Сатурн» и ПАО «Силловые машины» имеются все возможности для организации и восстановления производства газовых турбин единичной мощностью линейкой 65, 110 и 180 МВт, на базе которых можно формировать ПГУ в диапазоне мощностей 100 – 600 МВт.

Поэтому я надеюсь, что сегодняшнее решение, основанное на сообщениях и выступлениях его участников, будет способствовать продвижению серийного производства газотурбинного двигателя ГТД-110М.

## **Совместное заседание отмечает**

1. В соответствии с государственной программой «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» и подпрограммой «Силовая электротехника и энергетическое машиностроение», направленных на поддержание российских производителей газотурбинного оборудования, принято решение о совершенствовании конструкции газотурбинных двигателей ГТД-110, выпускаемых ПАО «ОДК-Сатурн» и установленных на электростанциях филиала «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО – Электрогенерация» и Рязанской ГРЭС-24. Направления работ по повышению надёжности и улучшению технических характеристик были определены по результатам эксплуатации газовых турбин на этих электростанциях и материалов экспертной комиссии, созданной по инициативе ПАО «Интер РАО», УК «РОСНАНО» и ПАО «ОДК-Сатурн».

2. Для реализации проекта модернизации ГТД-110 группой компаний создано ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии», перед которым была поставлена задача по совместной с ПАО «ОДК-Сатурн», работе по доведению ГТД-110 до технического уровня зарубежных ГТУ в данном классе мощности. В работе приняли участие наиболее компетентные в области газотурбостроения предприятия и институты: ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «Интер РАО», УК «РОСНАНО», ОАО «НПО ЦКТИ», ООО «ВТИ», ЗАО «Интеравтоматика», ОАО «ЦНИИТМАШ», ФГУП «ЦИАМ им. П.А. Баранова» и др.

3. В ходе реализации указанного проекта разработан ряд технологических и конструктивных мероприятий, позволяющих устранить ранее выявленные в процессе эксплуатации оборудования недостатки и дефекты и обеспечить требуемые показатели надёжности и экономичности. Всё модернизированное оборудование проходило испытания на стендах или в составе двигателей ГТД-110М заводской № 2 и заводской № 6.

4. Конструктивные и технологические мероприятия разрабатывались с учётом возможности параллельной проверки и обеспечения опережающей наработки на серийных двигателях в ячейках энергоблоков Ивановских ПГУ. Наиболее важными для решения поставленных задач явились мероприятия по рабочей лопатке первой ступени турбины и штатной камере сгорания.

Проведены также мероприятия по оптимизации теплового состояния сопловых аппаратов турбины, вибрационного состояния системы роторов, разработке составов и технологий нанесения термобарьерных и износостойких наноструктурированных покрытий.

Значимой работой проекта являлась разработка малоэмиссионной камеры сгорания на значение вредных выбросов NOx в 25 ppm в диапазоне 50 – 100 % мощностей от номинала.

По результатам стендовых испытаний и расчётного анализа для доводочных работ и испытаний в составе двигателя выбран вариант МЭКС разработки ОАО «ВТИ». Изготовлен комплект жаровых труб для постановки

на двигатель, подготовлены алгоритмы САУ и дополнительные системы розжига, контроля пульсаций и эмиссии.

В соответствии с техническим заданием ИЦ «ГТТ», ООО «ВТИ» и ЗАО «Интеравтоматика» разработали и реализовали в САУ стенда алгоритмы управления ГТД-110М с малоэмиссионной камерой сгорания с учётом доработанной схемы распределения топливного газа.

5. Эффективность и достаточность разработанных и проведённых мероприятий подтверждены в ходе исследований на стендах ПАО «ОДК-Сатурн», ОАО «НПО ЦКТИ», ООО «ВТИ» и нескольких этапов работы двигателя на стенде ПАО «Интер РАО» на площадке Ивановских ПГУ.

6. Параллельно с доводкой ГТУ проведены работы по улучшению показателей технологических систем ГТД-110М, в том числе усовершенствована тепло- и звукоизоляция, снижены гидравлические потери во входном тракте ГТУ, реализованы мероприятия по устранению вибраций выхлопного газохода. Выполнены пять этапов испытаний, в ходе которых проведены термо- и тензометрирование рабочих лопаток и дисков 1 – 4 ступеней турбины, термометрирование деталей статора турбины и деталей камеры сгорания.

В рамках проекта был также модернизирован двигатель ГТД-110 заводской № 6, который использован для подконтрольной эксплуатации в ячейке второго блока ПГУ-325. После наработки 2545 эквивалентных часов проведена его инспекция с частичной разборкой двигателя и эндоскопический осмотр всего газоздушного тракта, выполнена дефектация основных деталей и узлов.

7. Весь цикл испытаний двигателей ГТД-110М как опытного двигателя ГТД-110М заводской № 2 на испытательном стенде, так и находящегося в опытно-промышленной эксплуатации в ячейке блока ПГУ серийного двигателя ГТД-110М заводской № 6, сопровождался включением в работу всего необходимого объёма технологической автоматики: защиты, блокировки, регуляторов, сигнализации и т.д. Важно отметить, что высокий уровень автоматизации технологических процессов был реализован ЗАО «Интеравтоматика» на базе типовых программно-технических средств (ТПТС) целиком российского производства ФГУП «ВНИИА им. Духова» и доведён до типового решения, что является существенным шагом в развитии средств управления газовыми турбинами и открывает широкие возможности применения данного решения не только на ГТД-110М, но и на зарубежных газовых турбинах, а также при модернизации существующих турбин и локализации их производства в России.

8. Положительные результаты испытаний позволили допустить двигатель ГТД-110М заводской № 6 в опытно-промышленную эксплуатацию в ячейке блока ПГУ № 2 для работы по диспетчерскому графику. В настоящее время этот двигатель с комплексом внедрённых мероприятий успешно эксплуатируется в условиях конкурентного рынка электрической энергии и мощности. На сегодняшний день его суммарная наработка составляет 5166 эквивалентных часов. Таким образом, в результате выполнения проекта

модернизации двигателя ГТД-110М обеспечена его работоспособность с характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам.

9. Длительные испытания двигателя ГТД-110М заводской № 6 с внедрённым комплексом мероприятий в условиях испытательного стенда и опытно-промышленной эксплуатации дали положительный результат.

Разработанный комплекс мероприятий по проекту создания ГТД-110М включён в состав перевыпущенной конструкторско-технологической документации, которая готова к серийному производству.

10. Представленные к рассмотрению Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике материалы по проекту модернизации газотурбинного двигателя ГТД-110М свидетельствуют о большом объёме и высоком техническом уровне выполненных расчётно-аналитических, экспериментально-исследовательских и конструкторско-технологических работ, а также глубокой проработке проведённых мероприятий и решений. Комплексный подход, реализованный в ходе выполнения указанного проекта, позволил модернизировать и успешно испытать первый отечественный газотурбинный двигатель большой мощности.

11. Проект модернизации ГТД-110М, реализованный на площадке Ивановских ПГУ, является инновационным, поскольку он вводит в употребление значительно улучшенный процесс производства электроэнергии.

12. Целесообразно рекомендовать НП «Совет рынка» зарегистрировать для оборудования энергоблока ст. № 2 филиала Ивановские ПГУ АО «Интер РАО – Электрогенерация» признак генерирующего оборудования инновационного вида при работе на оптовом рынке электроэнергии и мощности в связи с наличием в его составе оборудования и решений инновационного вида (газовая турбина ГТД-110М).

13. Требуется разработать нормы повреждаемости для оценки технического состояния двигателя в условиях эксплуатации с целью принятия решения о продолжении его эксплуатации при выполнении технического обслуживания.

14. Необходимо провести испытания малоэмиссионной камеры сгорания в составе двигателя ГТД-110/ГТД-110М.

#### **Совместное заседание решило**

1. Одобрить работу ООО «ИЦ «Газотурбинные технологии», ПАО «Интер РАО», ПАО «ОДК-Сатурн», ООО «ВТИ» и УК «РОСНАНО» по модернизации газотурбинного двигателя ГТД-110 и доведении его технических характеристик и показателей надёжности работы до уровня, удовлетворяющего требованиям рынка электрической энергии и мощности Российской Федерации.

2. Считать положительным результат длительных испытаний двигателя ГТД-110 заводской № 6 с внедрённым комплексом мероприятий (облик ГТД-

110М) в условиях испытательного стенда и опытно-промышленной эксплуатации в составе ячейки блока ПГУ-325 суммарной наработкой 5166 эквивалентных часов.

3. Отметить, что разработанный комплекс мероприятий по проекту модернизации ГТД-110М включён в состав перевыпущенной конструкторско-технологической документации на ГТД-110М производства ПАО «ОДК-Сатурн», которая готова к серийному производству и соответствует постановлению Правительства РФ от 17.07.2015 г. № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации».

4. Отметить значительный объём выполненных в ходе проекта расчётно-аналитических работ с применением современных методик и программных комплексов, лабораторных и стендовых испытаний деталей и узлов, значительного числа металлургических и металлографических исследований и соответствие двигателя ГТД-110М заявленным в технических условиях характеристикам, соответствующих требованиям целевых показателей проекта, что подтверждено как в условиях испытательного стенда, так и в условиях ячейки блока ПГУ.

Считать проведённые в рамках инвестиционного соглашения работы и комплекс мероприятий по устранению недостатков и повышению надёжности двигателя ГТД-110 успешными и подтвердившими свою эффективность.

5. Отметить, что весь цикл работ проводился с высоким уровнем автоматизации технологических процессов, реализованным ЗАО «Интеравтоматика» на базе типовых программно-технических средств (ТПТС) российского производства ФГУП «ВНИИА им. Духова». Разработка доведена до типового решения, что является существенным шагом в развитии средств управления газовыми турбинами и открывает возможность применения данного решения не только на ГТД-110М, но и применительно к зарубежным газовым турбинам, например при модернизации существующих турбин и локализации их производства в России.

6. Признать целесообразным проведение комплекса испытаний ГТД-110М с постановкой (внедрением) малоэмиссионной камеры сгорания. При этом лидерный образец ГТД-110М с апробированной на стенде малоэмиссионной камерой сгорания по согласованию с заказчиком может быть изготовлен как в рамках нового двигателя, так и при капитальном ремонте одного из действующих двигателей, для сокращения сроков внедрения.

7. Рекомендовать ПАО «ОДК-Сатурн» продолжить работы по импортозамещению комплектующих изделий ГТД-110М, созданию норм повреждаемости и внедрению удалённого мониторинга параметров в эксплуатации двигателя.

8. Признать проект модернизации ГТД-110М, реализованный на площадке Ивановских ПГУ инновационным и считать целесообразным присвоить энергоблоку № 2 статус инновационной площадки для отработки технических решений по доводке тепловой схемы и режимов работы ПГУ-325 с получением соответствующих преференций со стороны НП «Администратор

торговой системы» и НП «Совет рынка» при работе на оптовом рынке электроэнергии и мощности.

9. Рекомендовать НП «Совет рынка» зарегистрировать для оборудования энергоблока ст. № 2 филиала «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО – Электрогенерация» признак генерирующего оборудования инновационного вида при работе на оптовом рынке электроэнергии и мощности, в связи с наличием в его составе оборудования и решений инновационного вида (газовая турбина ГТД-110М).

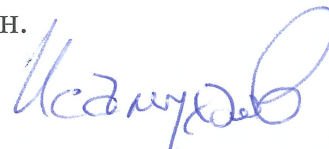
10. Рекомендовать Минэнерго и Минпромторгу РФ модернизированный двигатель отечественного производства ГТД-110М к широкому применению в энергетике, имея ввиду использование его как в программах технического перевооружения ТЭС, работающих на природном газе, так и при строительстве новых электростанций на территории Российской Федерации.

Первый заместитель Председателя  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор,  
академик АЭН



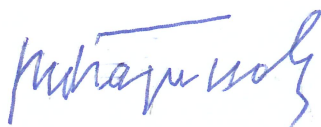
В.В. Молодюк

Учёный секретарь  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС»,  
к.т.н.



Я. Ш. Исамухамедов

Учёный секретарь Секции по  
проблемам надёжности и безопасности  
больших систем энергетики Научного  
совета РАН по системным  
исследованиям в энергетике,  
заведующий отделением  
АО «Энергетический институт  
им. Г.М. Кржижановского»,  
д.т.н., академик АЭН



В.А. Баринов