

DOI: 10.18721/JEST.25101  
УДК 536.24:620.9:621.165

*Ю.К. Петреня*

ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

## **О ПРОГРАММЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ\***

Газу отведена важнейшая роль в текущем и перспективном топливном энергетическом балансе России и многих стран, включая США и Европу. Применение газотурбинных энергетических технологий, достигших высокого уровня развития, обеспечивает повышение энергоэффективности и конкурентоспособности российской энергетики. Перспективный рынок этих технологий представляет большой интерес для российской промышленности, в том числе и для повышения её экспортного потенциала. В России есть опыт разработки и освоения газовых энергетических турбин, большой научный и промышленный потенциал для разработки газовых энергетических технологий конкурентного мирового уровня. Предложено реализовать комплексную научно-технологическую инвестиционную программу (национальный проект) по данному направлению. Отмечено, что развитие отечественных газотурбинных энерготехнологий – один из важнейших приоритетов обеспечения энергобезопасности и научно-технологического развития Российской Федерации. Реализацию этого мультидисциплинарного в научном и прикладном плане проекта, координацию работ и кооперацию академической, отраслевой и вузовской науки с промышленностью предложено проводить под научно-методическим руководством РАН (ОЭММПУ РАН).

*Ключевые слова:* газовые энергетические турбины, современная и перспективная энергетика, энергоэффективность, энергобезопасность, фундаментальные исследования, комплексная инвестиционная научно-исследовательская программа (национальный проект).

*Ссылка при цитировании:*

Ю.К. Петреня. О программе разработки российских газотурбинных энерготехнологий // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 8–18. DOI: 10.18721/JEST.25101.

*Yu.K. Petrenya*

PJSC «Power machines», St. Petersburg, Russia

## **DEVELOPMENT PROGRAM OF RUSSIAN GAS TURBINE POWER TECHNOLOGIES**

Gas plays a crucial role in the current and future fuel energy balance of Russia and many countries, including the United States and Europe. Energy efficiency is enhanced by using highly advanced technologies for gas turbine energy. Ensuring the competitiveness of the Russian energy sector involves using gas turbines and com-

---

\* По материалам доклада «Развитие газотурбинных энергетических технологий в России» на Общем собрании РАН 13 декабря 2018 года.



bined-cycle plants. The promising market for these technologies is of great interest to the Russian industry, particularly, for increasing its export potential. Russia has experience in development and integration of gas energy turbines, a large scientific and industrial potential for devising new, globally competitive gas energy technologies. It was proposed to implement a comprehensive science and technology investment program (national project) in this area. It is noted that developing domestic gas-turbine power technologies is one of the most important priorities in ensuring energy security and scientific and technological development of the Russian Federation. It was proposed to coordinate the implementation of the project that is multidisciplinary from a scientific and applied standpoint and cooperation of academic, sectoral and university science with industry under the scientific and methodological guidance of the Russian Academy of Sciences (OEMMP RAS).

*Keywords:* gas energy turbines, modern and future energy, energy efficiency, energy security, basic research, a comprehensive investment research program (national project).

*Citation:*

Yu.K. Petrenya, Development program of Russian gas turbine power technologies, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 8–18, DOI: 10.18721/JEST.25101.

### **Газовая электрогенерация, энергобезопасность, перспективный рынок**

Газотурбинные энергетические технологии – одна из важнейших составляющих современной и перспективной энергетики. Это определяется ролью, которую играет газ в топливном энергетическом балансе как России, так и ведущих стран Европы и США: в России доля газа составляет порядка 50 %, в США и Европе – соответственно более 40 и 20 %. Таким образом, эффективное использование газа в энергетическом оборудовании даже в настоящее время требует применения парогазового цикла, построенного на базе энергетических газовых турбин [1–6]\*\*.

Линейный прогноз на 35 лет на базе достоверных данных за предыдущий период про-

\*\* См. также:

Энергетическая стратегия России до 2035 года. (Разработана во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 6 июля 2013 г. № Пр-1471 о корректировке Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р и предусматривающей обновление каждые пять лет. Продление стратегического периода до 2035 года выполнено в соответствии с поручением Правительства Российской Федерации (протокол заседания Правительства РФ);

Стратегия научно-технологического развития России до 2035 года. Утверждена Указом Президента РФ от 01.12.2016 года № 642.

должительностью 70 лет (с 1965 года) показывает, что доля газа в мировом топливном балансе к 2070 году достигнет величины порядка 30 % при одновременном росте новых генерирующих мощностей (рис. 1, табл. 1). Суммарная мощность газовой электрогенерации в мире к 2035 и 2070 годам вырастет соответственно примерно в 2 и 4 раза, что указывает на большой сегмент перспективного рынка для энергетического машиностроения. Для получения своей доли на этом рынке российская промышленность должна предлагать конкурентоспособное оборудование, в том числе энергетические газовые турбины.

Если в 1965 году общая мощность газовой генерации в мире была 0,11 ТВт, а в 2015 году – 1,29 ТВт, то в 2035 и в 2070 годах она составит соответственно 2,49 и 4,38 ТВт, то есть в мире образуется большой перспективный рынок для газотурбинных энергетических технологий [1–3, 7].

После осуществления программы ДПМ к настоящему времени 12 % энергетики России базируются на зарубежных газовых турбинах большой мощности и парогазовых установках на их основе, что создаёт существенные риски для энергобезопасности страны. Эта проблема существенно обостряется на фоне санкционной и запретительной политики западных стран, которая проявилась при поставках газовых турбин в Крым [8].

Доля в топливном балансе, %

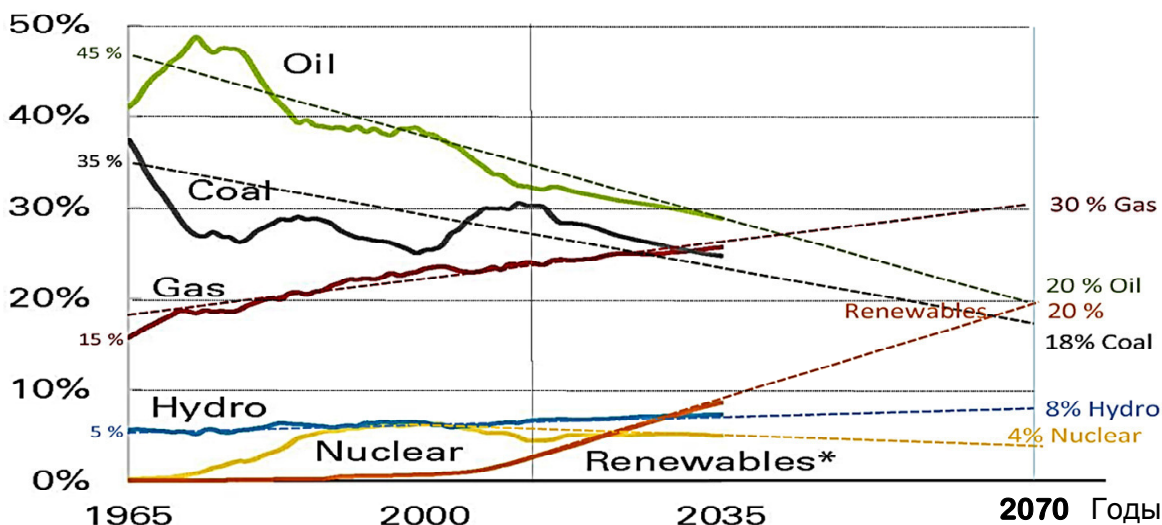


Рис. 1. Доля газа в мировом топливном энергетическом балансе

Fig. 1. Share of gas in global fuel energy balance

Таблица 1  
Доля газа в мировом топливном энергетическом балансе и мощность генерации по годам

Table 1

Gas share in world fuel energy balance and generation capacity by years

Год	Доля газа в топливном балансе, %	Мощность газовой генерации, ТВт	Общая мощность, ТВт
1965	15	0,11	0,73
2015	23	1,29	5,6
2035*	26	2,49	9,6
2070**	30	4,38	14,6

\* Прогноз IEA, ВР.

\*\* Линейный прогноз.

Другой существенный риск для энергобезопасности России – технологическая монополизация рынка мощных газовых турбин. Оригинальными разработчиками и производителем

являлись мощными газотурбинными установками (более 300 МВт) являются фактически только три компании – General Electric (Alstom стал частью General Electric), Siemens и Mitsubishi Heavy Industries [9–11].

Потенциально важна роль газотурбинных энергетических технологий в перспективной энергетике ближайших десятилетий, когда произойдет переход от моноцелевых монотопливных электростанций к многоцелевым многотопливным энергохимическим комплексам. Ключевым элементом таких энергохимических комплексов будут газовые энергетические турбины большой мощности с высоким уровнем температуры на входе в турбину.

Российские энергомашиностроение и энергетика должны располагать конкурентоспособными газовыми турбинами и парогазовыми установками, которые позволят решить проблемы энергоэффективности и энергобезопасности российской энергетике и обеспечить экспорт этих установок на мировой энергетический рынок.

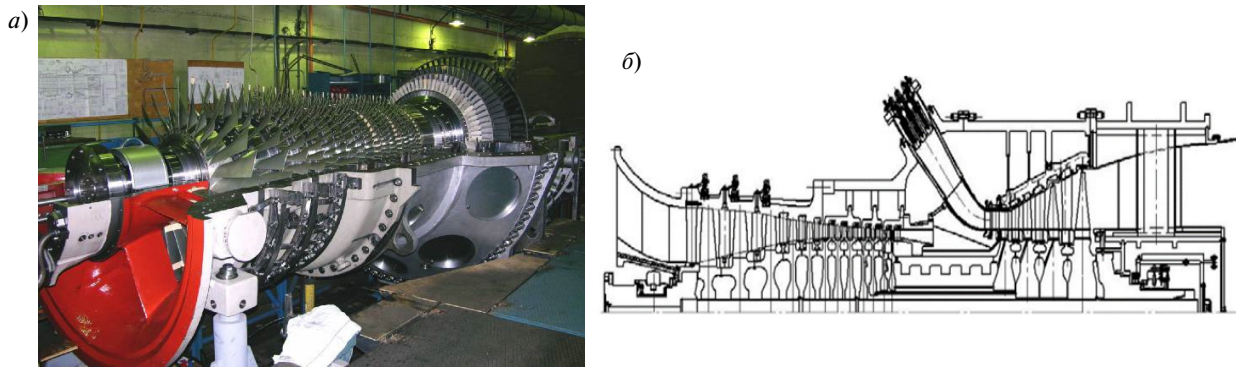


Рис. 2. Газовая энергетическая турбина ГТЭ-65 (а) и проект газовой турбины ГТЭ-300 ПАО «Силловые машины» (б)

Fig. 2. Gas turbine GTE-65 by Power Machines OJSC (a) and project of gas turbine GTE-300 by Power Machines OJSC (b).

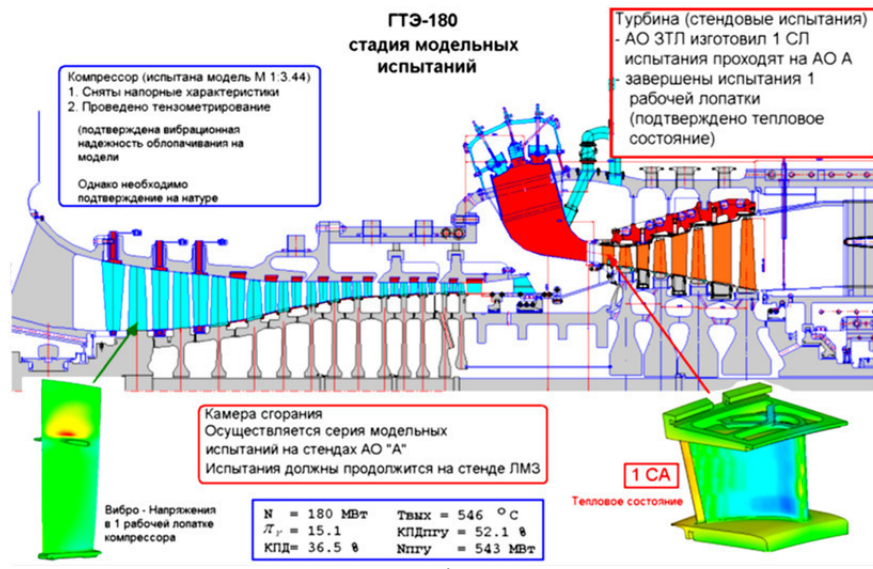


Рис. 3. Газовая энергетическая турбина ГТЭ-180 (совместный проект ЛМЗ и ОАО «Авиадвигатель»)

Fig. 3. Gas turbine GTE-180 (joint project of LMZ and Aviadvigatel OJSC)

### Газотурбинные энерготехнологии

В России есть опыт разработки и освоения мощных газовых турбин. В 60–70-е годы прошлого века была разработана и освоена рекордная по мощности – 100 МВт – газовая турбина ГТ-100 ЛМЗ. В последние десятилетия был получен опыт производства лицензионных газовых турбин Е-класса мощностью 160 МВт, разработана и испытана в условиях станции газовая турбина ГТ-65, выполнены проекты турбин мощностью 180 МВт (ЛМЗ-ОАО «Авиадвигатель») и 170, 300 МВт (ПАО «Силловые машины») (рис. 2, 3) [12–15].

Последние пятьдесят лет в мире происходило постоянное развитие газовых энергетических турбин. Их единичная мощность выросла со 100 до более 500 МВт, коэффициент полезного действия парогазовых установок на их базе достиг 62%. Классы газотурбинных энерготехнологий и температуры на входе в газовую турбину и на выходе газовой турбины приведены в табл. 1. Для J-класса температура на входе в газовую энергетическую турбину может достигать 1700 °C (табл. 2).

Таблица 2

**Классы газотурбинных энерготехнологий**

Table 2

**Classes of gas turbine power technologies**

Класс газотурбинной технологии	Температура на входе в газовую турбину, °С	Температура на выхлопе газовой турбины, °С	Класс параметров КУ, паровой турбины в составе ПГУ
E	≤ 1150	500–540	SC ( <i>SuperCritical</i> )
F	1150–1300	600	USC ( <i>UltraSuperCritical</i> )
H	1300–1500	640	A-USC ( <i>Advanced UltraSuperCritical</i> )
J	1500–1700	680	A-USC ( <i>Advanced UltraSuperCritical</i> )

Газовые турбины по совокупности решений, объединённых в систему, – один из самых сложных технических объектов, которые создало человечество. Входной барьер в газотурбинные технологии достаточно высок, так как необходимы крупные инвестиции в фундаментальные и прикладные исследования, в опытно-конструкторские работы на этапе разработки, должны быть в наличии школа проектирования высокого уровня, конструкторские наработки, серьёзная технологическая база, развитая сервисная служба.

**Комплексная инвестиционная научно-исследовательская программа (национальный проект)**

Вопрос о важности разработки отечественных мощных газовых турбин неоднократно ставился Российской академией наук. В 2014 году обращение на эту тему академика В.Е. Фортова, министра энергетики А.В. Новака и министра промышленности и торговли Д.В. Мантурова было направлено Президенту РФ В.В. Путину, который поддержал данную инициативу. Ряд обращений в Правительство РФ и ведомства с разъяснением важности для страны разработки и освоения газовых энергетических турбин были подготовлены и направлены академиком О.Н. Фаворским. Соответствующие рекомендации были разработа-

ны Комиссией по газовым турбинам РАН, которую возглавляет член-корреспондент РАН Г.Г. Ольховский. Необходимо также отметить недавние рекомендации на тему газовых энергетических турбин Совета РАН по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии» под председательством академика В.Е. Фортова. В РАН были разработаны предложения по модернизации тепловой энергетики страны, в том числе по применению газотурбинной надстройки с паротурбинным блоком повышенной эффективности тепловой электростанции (патент на изобретение академика О.Н. Фаворского, члена-корреспондента РАН Ю.К. Петрени и др.).

Учитывая несомненную актуальность и важность для безопасности и экономики страны наличия компетенций по мощным газовым турбинам, предлагается сформировать и реализовать комплексную научно-технологическую инвестиционную программу (национальный проект) по разработке и освоению отечественных газотурбинных энергетических технологий.



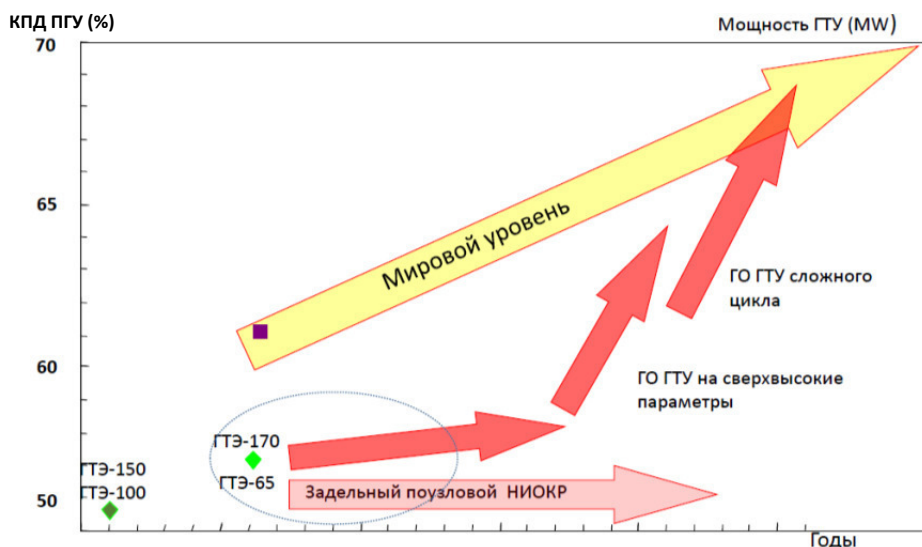


Рис. 4. Схема достижения перспективного мирового уровня газотурбинных энергетических технологий на базе опережающих фундаментальных и прикладных исследований

Fig. 4. Scheme for gas-turbine power technologies based on advanced fundamental and applied research to become globally competitive

В основе этого проекта должны лежать опережающие фундаментальные исследования и прикладные работы, позволяющие в сжатые сроки выйти на перспективный мировой уровень газотурбинных энергетических технологий (рис. 4). Основными областями необходимых фундаментальных исследований являются:

аэродинамика различных узлов газовой турбины, позволяющая на базе верифицированных кодов и программных комплексов полным образом описать аэродинамические условия в компрессоре, в камере сгорания и турбине, в системах охлаждения;

физико-химические и теплофизические процессы в камерах сгорания, в том числе при использовании низкокалорийного синтез-газа с добавлением водорода и применении мембранных технологий;

разработка перспективных материалов и функциональных покрытий для элементов горячего тракта газовых турбин на температуры до 1700 °С, в том числе керамических материалов и аддитивных технологий;

методы решения связанных задач и сквозного суперкомпьютерного проектирования,

обеспечивающего испытания и доводку газовой турбины большой мощности в виртуальном пространстве при меньших финансовых и временных затратах. Фундаментальные исследования по этим и другим необходимым направлениям могут быть выполнены силами академической и вузовской науки.

На следующем уровне детализации к областям фундаментальных исследований могут быть отнесены следующие направления работ (подготовлены с участием Института теплофизики СО РАН) [16–19].

**Аэродинамика проточного тракта, обтекание компрессорных и турбинных лопаток**, включая численное моделирование и оптимизацию трехмерной аэродинамики потока на основе верифицированных вычислительных кодов и программных комплексов, определение условий (и устранение) возникновения отрыва потока, нестационарных режимов, автоколебаний, снижение утечек воздуха через зазоры лопаток, аэродинамику, теплообмен и акустику входного аппарата (в том числе проблема обледенения); разработка и внедрение методов эффективного управления аэродинамикой по-

тока на основе адаптивного локального воздействия и обратной связи с использованием методов машинного обучения.

**Системы охлаждения**, в том числе оптимизация аэродинамики высокотемпературного потока и теплообмена, организация тепловой защиты с учетом трехмерности и нестационарности, а также эффективного теплоотвода с использованием микроканальных двухфазных течений.

**Проблемы в камерах сгорания (аэродинамика, физико-химические процессы, все теплофизические аспекты, экология, эффективность):**

проработка мероприятий по снижению вредных выбросов и повышению эффективности сжигания топлива, в т. ч. организация беспламенного горения, внедрение катализаторов, паровая газификация, достижение сверхадиабатных температур, рекуперация тепла. Проработка возможности организации горения синтез-газа (в том числе низкокалорийного). Проработка решений для реализации горения с добавлением водорода, горения топлива в условиях частичного отделения азо-

та из воздуха на входе в установку с использованием мембранных технологий;

оптимизации аэродинамики высокотемпературного потока и режимов горения с учетом особенностей химического реагирования, трехмерности и нестационарности. Разработка достоверных кинетических моделей химического реагирования при повышенном давлении и температуре;

организация горения при значительном обеднении смесей (Dry Lean Premixed Prevaporized) – снижение пиковых температур; анализ условий возникновения виброгорения и срыва; дежурное пламя и горение с избытком воздуха в основном канале (концепция TAPS I, II, III); проработка управления нестационарными режимами при управлении подачей топлива;

проработка других перспективных методов организации горения (Lean direct injection и др. Low-swirl burner) – снижение времени пребывания и выбросов  $\text{NO}_x$  для бедных смесей (рис. 5);

определение условий возникновения автоколебаний и термоакустического резонанса;

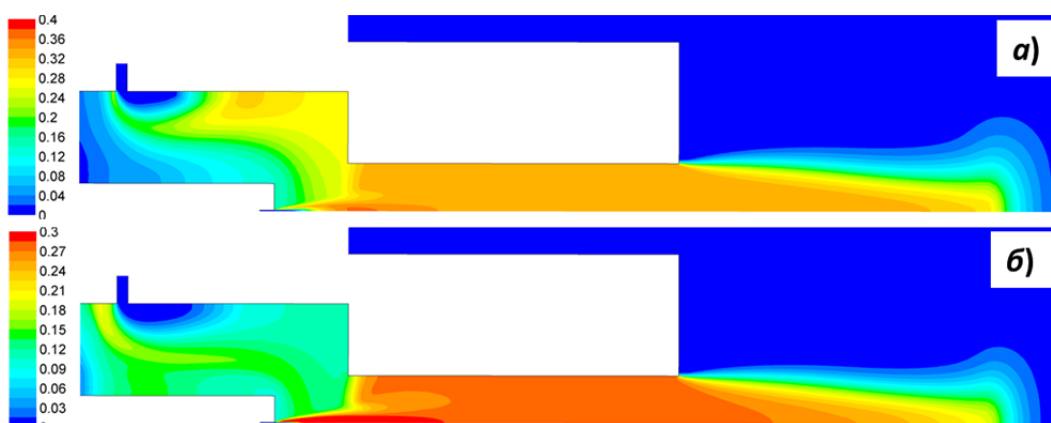


Рис. 5. Распределение объёмной доли  $\text{CO}$  (а) и  $\text{H}_2$  (б) в факеле (данные Института теплофизики СО РАН, полученные в рамках программ фундаментальных исследований государственных академий наук, Президиума РАН, РФФИ, РНВ, ФЦП)

Fig. 5. Distribution of volume fractions of  $\text{CO}$  (a) and  $\text{H}_2$  (b) in the flare (data from Institute of Thermophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, obtained within the framework of basic research programs of state academies of sciences of Presidium of Russian Academy of Sciences, RFBR, RSF, FTP)



разработка и внедрение методов эффективного управления смешением и горением на основе адаптивного локального воздействия и обратной связи с использованием методов машинного обучения.

**Перспективные материалы для горячего тракта, керамика, аддитивные технологии:**

исследование свойств (теплофизических) и фазовой стабильности перспективных конструкционных материалов при высоких температурах;

анализ эффективности использования функциональных (теплозащитных) покрытий;

исследования теплообмена в процессе нанесения термобарьерных покрытий на поверхность лопаток из потока паров металл-органических соединений (совместно с ИНХ СО РАН).

**Сквозное суперкомпьютерное моделирование газовой турбины с целью уменьшения финансовых и временных затрат на проектирование:**

разработка и внедрение верифицированных вычислительных кодов и программных комплексов для достоверного компьютерного моделирования термогазодинамики потока, теплообмена и горения с целью оптимизации работы газовых турбин и снижения вредных выбросов;

проработка решений для реализации комбинированных циклов (впрыск пара и др.) – оптимизация аэродинамики, теплообмена и горения, расширение и верификация расчетных кодов;

получение фундаментальных результатов в этих областях при применении современных экспериментальных методов лабораторных исследований, в том числе разработанных и освоенных в СО РАН, в Институте теплофизики РАН (в качестве примера можно упомянуть такие методы, как измерение смесеобразования в камерах сгорания при высокоскоростной регистрации (в том числе в ИК и УФ диапазонах), системы машинного зрения (2D и 3D с высоким временным разрешением), лазерные системы бесконтактной диагностики

потоков и процессов горения (ЛИФ, КАРС и т. д.), методы вычислительной томографии для задач аэрогидродинамики и другие методы).

Выполнение данного комплекса исследований требует широкого участия академических и отраслевых институтов, вузовской науки. В первую очередь к ним относятся такие институты, как ИВТАН, Институт теплофизики и ряд других институтов СО РАН, ИМаш РАН, ИНЭИ РАН, ЦИАМ, СПбПУ, МЭИ, МВТУ, УГАТУ (Уфимский авиационный технический университет), СГАУ (Самарский авиакосмический университет), ВТИ, НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова, ВИАМ, НПО ЦНИИТМаш, ЦНИИ КМ «Прометей» и др.

Необходимость проведения большого объёма поузловых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и стендовых испытаний определяет потребность участия в данном проекте отраслевой науки и высокотехнологичных компаний энергомашиностроения и авиадвигателестроения. Большой потенциал для выполнения прикладных исследований и стендовых испытаний имеется в организациях ОДК (Объединённой двигателестроительной корпорации), ЦИАМ, ОАО «САТУРН», ОАО «Авиадвигатель», «РЭП-холдинг», ВТИ, НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова, ПАО «Силовые машины» и др. (рис. 6).

Особенности режимов эксплуатации мощных газовых турбин и требования к надёжности турбин должны быть учтены и обеспечены с помощью систем автоматического управления, мониторинга и диагностики, построенных на базе динамических математических моделей, специальных алгоритмов и программного обеспечения.

Обеспечение изготовления газовых турбин деталями и заготовками (такими, как лопатки, диски, ротора и т. п.) возможно на базе разработки и развития перспективных металлургических технологий в кооперации академической, вузовской и отраслевой науки с металлургическими компаниями [20, 21]. Данное



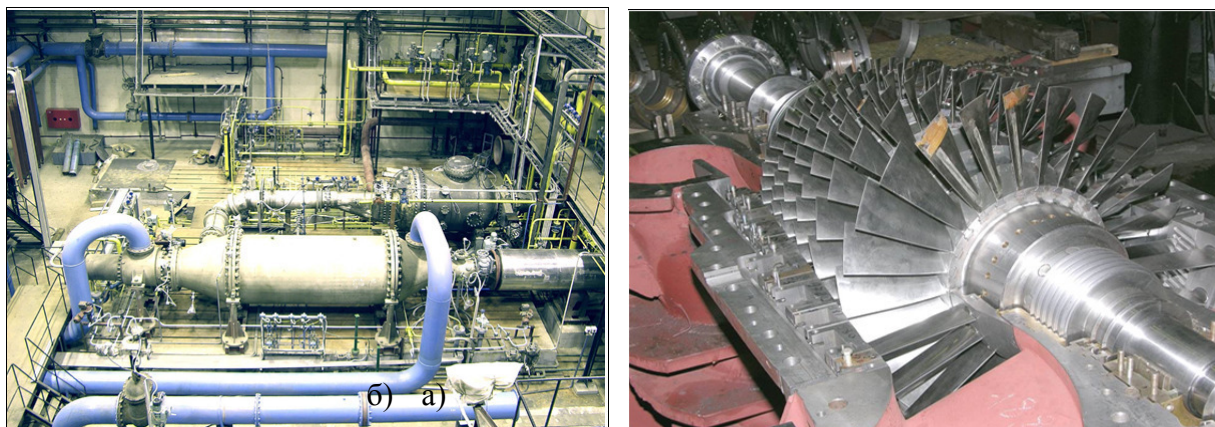


Рис. 6. Экспериментальные стенды для огневых испытаний камер сгорания (ПАО «Силловые машины») (а) и компрессоров (НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова) (б)

Fig. 6. Experimental stands for fire tests of combustion chambers of Power Machines OJSC (a) and compressors of I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (b)

направление работ потребует участия как институтов, так и промышленных компаний. Это, в первую очередь, ВИАМ, НПО ЦНИИТМаш, ЦНИИ КМ «Прометей», ВИЛС, ОМЗ-Спецсталь, Петрозаводскмаш и другие организации.

Другие важные научные направления при создании перспективных газовых турбин связаны с проблемами обеспечения эксплуатации, сервиса и восстановительного ремонта. Успешное решение этих проблем также требует широкой кооперации научных, производственных и эксплуатирующих организаций.

Основными этапами освоения отечественных газотурбинных энерготехнологий должны быть следующие:

1-й этап – восстановление компетенций в Е-классе в течение 5-ти лет (к 2022–2023 гг.), включая разработку и серийное производство отечественных газовых турбин средней и большой мощности для обеспечения программы ДПМ-штрих. Предполагается финансирование этого этапа проекта из средств бюджета и из собственных средств ПАО «Силловые машины»;

2-й этап – разработка и освоение газовых турбин F/H-класса в течение 10-ти лет (к 2028 году);

3-й этап – разработка и освоение газовых турбин J-класса в течение 15-ти лет (к 2033 году)

### Заключение

Комплексная научно-технологическая инвестиционная программа (национальный проект) по разработке перспективных газовых турбин отвечает интересам Российской Федерации. Она необходима для обеспечения конкурентоспособности и экспортного потенциала промышленности, решения текущих и перспективных задач энергетики XXI века

Уровень и значение этого Проекта для страны требуют его поддержки Правительством РФ, активного участия профильных министерств, промышленных партнёров и реального бюджетного финансирования.

Реализацию мультидисциплинарного в научном и прикладном плане Проекта, координацию работ и кооперацию академической, отраслевой и вузовской науки с промышленностью необходимо осуществлять под научно-методическим руководством РАН (ОЭММПУ РАН).

Развитие отечественных газотурбинных технологий является одним из важнейших приоритетов при обеспечении энергобезопасности и научно-технологического развития Российской Федерации.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook. 2018: [Электр. ресурс] <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>
2. **Фортов В.Е., Попель О.Н.** Энергетика в современном мире. М.: Изд-во Интеллект, 2011. 168 с.
3. **Петреня Ю.К.** По законам физики и экономики. [Электр. ресурс] <https://stimul.online>Интервью>По законам экономики и физики, 2018>.
4. **Ольховский Г.Г., Тумановский А.Г.** Теплоэнергетические технологии в период до 2030 г. // Известия РАН. Энергетика. 2008. № 6. С. 79–94.
5. **Фаворский О.Н., Полищук В.Л.** Выбор тепловой схемы и профиля отечественной мощной энергетической ГТУ нового поколения и ПГУ на ее основе // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 2.
6. **Иноземцев А.А., Хайрулин В.Т., Тихонов А.С., Самохвалов Н.Ю.** Совершенствование методик проектирования современных газовых турбин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5(47). Часть 1. С. 139–145.
7. **Федюк Е.Р.** Научная школа С.А. Христиановича в сфере энергетики // Личность. Культура. Общество: Сборник научных статей. Новосибирск, 2010. С. 148–162.
8. **Schmalzer В.А.** Gas Turbine Boom Begins: International Turbomachinery Handbook. 2008
9. **Филиппов С.П., Дильман М.Д.** ТЭЦ в России: необходимость технологического обновления // Теплоэнергетика. 2018. № 11. С. 1–18.
10. Газовые энергетические турбины GE от 16 до 510 МВт. [Электрон. ресурс] <https://ge.com>power/gas/gas-turbines>
11. Газовые турбины Siemens HL-класса – SGT5-8000HL, SGT5-9000HL и SGT6-9000HL. [Электр. ресурс] <https://politexpert.net/123615-rekord-proizvoditelnosti-siemens-predstavil-sverkhmoshnyu-u-gazovuyu-turbinu>
12. MHI The state-of-the-art J-series gas turbines with a turbine inlet temperature of 1,600 °C. [Электр. ресурс] [https://mhi.com>products/energy/gas\\_turbine.html](https://mhi.com>products/energy/gas_turbine.html)
13. **Крюгер В.Д., Сорочан И.П., Петреня Ю.К., Лебедев А.С., Симин Н.О., Векшин О.Д., Залетов И.В., Коначков В.А.** Энергетические газотурбинные установки производства ОАО «Силовые машины» // Газотурбинные технологии. 2009. № 3(74). С. 2–8.
14. **Лебедев А.С., Симин Н.О., Петреня Ю.К., Михайлов В.Е.** Проект энергетической газотурбинной установки ГТЭ-65 // Теплоэнергетика. 2008. № 1. С. 46–51.
15. **Кондратьев В.Н., Лебедев А.С., Симин Н.О., Сергеев А.Г.** Газовые турбины «Интертурбо» для блоков ПГУ в России // Электрические станции. 2011. № 7. С. 37–41.
16. **Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.** Газотурбинные двигатели. Пермь: Изд-во ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1204 с.
17. **Лобасов А.С., Абдуракипов С.С., Чикишев Л.М., Дулин В.М., Маркович Д.М.** Исследование формы пламени в нестационарном потоке закрученной турбулентной струи методом НСНО PLIF // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 6. С. 17–24.
18. **Чикишев Л.М., Дулин В.М., Гобызов О.А., Лобасов А.С., Маркович Д.М.** Исследование смесеобразования в модели камеры сгорания ГТУ с использованием панорамных оптических методов // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. № 3. С. 357–364.
19. **Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Hanjalić K.** Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Phys. Fluids. 2014. Vol. 26. 065109.
20. **Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Y.S., Markovich D.M., Shtork S.I., Tokarev M.P.** Flow structure of swirling turbulent propane flames // Flow. Turbul. Combust. 2011. Vol. 87. P. 569–595.
21. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники. – Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
22. **Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Хвацкий К.К.** Длительная прочность никелевых сплавов для монокристаллических лопаток газотурбинных установок // Конверсия в машиностроении. 2005. № 3. С. 60–64.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЕТРЕНЯ Юрий Кириллович** – доктор физико-математических наук профессор член-корреспондент РАН заместитель генерального директора – технический директор ПАО «Силовые машины»  
E-mail: [soloveva\\_na2@power-m.ru](mailto:soloveva_na2@power-m.ru)

Дата поступления статьи в редакцию: 30.01.2019

## REFERENCES

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook. 2018. URL: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>
- [2] Fortov V.Ye., Popel O.N. Energetika v sovremennom mire. M.: Izd-vo Intellekt, 2011. 168 s. (rus.)
- [3] Petrenya Yu.K. Po zakonam fiziki i ekonomiki. [Electron. resurs] // [https://stimul.online>Intervyu>Po zakonam ekonomiki i fiziki](https://stimul.online>Intervyu>Po-zakonam-ekonomiki-i-fiziki), 2018. (rus.)
- [4] Olkhovskiy G.G., Tumanovskiy A.G. Teploenergeticheskiye tekhnologii v period do 2030 g. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2008. № 6. S. 79–94. (rus.)
- [5] Favorskiy O.N., Polishchuk V.L. Vybory teplovykh skhemy i profilya otechestvennoy moshchnoy energeticheskoy GTU novogo pokoleniya i PGU na yeye osnove. *Teploenergetika*. 2010. №2. S. 2. (rus.)
- [6] Inozemtsev A.A., Khayrulin V.T., Tikhonov A.S., Samokhvalov N.Yu. Sovershenstvovaniye metodik proyektirovaniya sovremennykh gazovykh turbin. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2014. № 5(47). Chast 1. S. 139–145. (rus.)
- [7] Fedyuk Ye.R. Nauchnaya shkola S.A. Khristianovicha v sfere energetiki. *Lichnost. Kultura. Obshchestvo: Sbornik nauchnykh statey*. Novosibirsk, 2010. S. 148–162. (rus.)
- [8] Schmalzer B.A. Gas Turbine Boom Begins: International Turbomachinery Handbook. 2008.
- [9] Filippov S.P., Dilman M.D. TETs v Rossii: neobkhodimost tekhnologicheskogo obnoveniya. *Teploenergetika*. 2018. № 11. S. 1–18. (rus.)
- [10] Gazovyye energeticheskiye turbiny GE ot 16 do 510 MVt. [Electron. resurs] URL: <https://ge.com>power/gas/gas-turbines>
- [11] Gazovyye turbiny Siemens HL-klassa – SGT5-8000HL, SGT5-9000HL i SGT6-9000HL. URL: <https://politexpert.net/123615-rekord-proizvoditelnosti-siemens-predstavil-sverkhmoshnuyu-gazovuyu-turbinu>
- [12] MHI The state-of-the-art J-series gas turbines with a turbine inlet temperature of 1,600 °C. URL: [https://mhi.com>products/energy/gas\\_turbine.html](https://mhi.com>products/energy/gas_turbine.html)
- [13] Kryuger V.D., Sorochan I.P., Petrenya Yu.K., Lebedev A.S., Simin N.O., Vekshin O.D., Zaletov I.V., Konashkov V.A. Energeticheskiye gazoturbinnyye ustanovki proizvodstva OAO «Silovyye mashiny». *Gazoturbinnyye tekhnologii*. 2009. № 3(74). S. 2–8. (rus.)
- [14] Lebedev A.S., Simin N.O., Petrenya Yu.K., Mikhaylov V.Ye. Proyekt energeticheskoy gazoturbinnoy ustanovki GTE-65. *Teploenergetika*. 2008. № 1. S. 46–51. (rus.)
- [15] Kondratyev V.N., Lebedev A.S., Simin N.O., Sergeyev A.G. Gazovyye turbiny «Interturbo» dlya blokov PGU v Rossii. *Elektricheskiye stantsii*. 2011. № 7. S. 37–41. (rus.)
- [16] Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinnyye dvigateli. Perm: Izd-vo OAO «Aviadvigatel», 2006. 1204 s. (rus.)
- [17] Lobasov A.S., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Markovich D.M. Issledovaniye formy plameni v nestatsionarnom potoke zakruchennoy turbulentnoy strui metodom HCHO PLIF. *Fizika goreniya i vzryva*. 2018. T. 54. № 6. S. 17–24. (rus.)
- [18] Chikishev L.M., Dulin V.M., Gobyzov O.A., Lobasov A.S., Markovich D.M. Issledovaniye smeseobrazovaniya v modeli kamery sgoraniya GTU s ispolzovaniyem panoramnykh opticheskikh metodov. *Teplofizika i Aeromekhanika*. 2017. T. 24. № 3. S. 357–364. (rus.)
- [19] Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Hanjalić K. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Phys. Fluids*. 2014. Vol. 26. 065109.
- [20] Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Y.S., Markovich D.M., Shtork S.I., Tokarev M.P. Flow structure of swirling turbulent propane flames. *Flow Turbul. Combust.* 2011. Vol. 87. P. 569–595.
- [21] Kablov Ye.N. Materialy i khimicheskiye tekhnologii dlya aviatsionnoy tekhniki. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. T. 82, № 6. S. 520–530. (rus.)
- [22] Golubovskiy Ye.R., Svetlov I.L., Khvatskiy K.K. Dlitelnaya prochnost nikelovykh splavov dlya monokristallicheskikh lopatok gazoturbinnyykh ustanovok. *Konversiya v mashinostroyenii*. 2005. № 3. S. 60–64. (rus.)

## THE AUTHORS

PETRENYA Yurii K. – PJSC «Power machines»  
E-mail: [soloveva\\_na2@power-m.ru](mailto:soloveva_na2@power-m.ru)

Received: 30.01.2019