

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С НАНОДОБАВКАМИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МИКРОТУРБИНЫ НА ЕЕ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

О.С. Сироткин, ген. дир. ОАО «Национальный институт авиационных технологий», д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН

С.Б. Рыцев, нач. научно-экспериментальной лаборатории ОАО «Национальный институт авиационных технологий», канд. техн. наук

В.Г. Конаков, дир. НТЦ «Стекло и керамика», д-р хим. наук, проф.

А.В. Сударев, ген. дир., ген. конструктор ООО «Центр Бойко», д-р техн. наук, проф., академик АТР РФ

В статье рассмотрены вопросы разработки технологии изготовления керамической компактной когенерационной (теплообменной) энергетической установки, ее ответственных деталей, в том числе: турбины, соплового аппарата, теплообменника, камеры сгорания с определением оптимальных технологических параметров на базе лазерного послойного синтеза. Отмечены преимущества новых технологий, по ряду параметров превосходящих мировые.

Ключевые слова: керамические порошки, компактная когенерационная энергетическая установка, турбина, сопловой аппарат, теплообменник, камера сгорания, нанодобавки, технология лазерного послойного синтеза, математическая модель, параметры теплообмена.

С 1995 г. в ОАО «Национальный институт авиационных технологий» (НИАТ) проводились работы по применению технологии послойного синтеза (ТПС) из светочувствительного жидкого фотополимера (SLA-технологии) и листового послойного синтеза (LOM-технология фирмы Helisys, США) при изготовлении деталей сложных форм, в том числе: оснастки, мастер-моделей, макетов и прототипов изделий. Технологии были внедрены в ОАО «КБ Сухого» и ОКБ «Звезда».

Применение технологий лазерного послойного синтеза значительно сократило цикл подготовки производства новых изделий: перчаток космического скафандра, самолетных деталей из листового материала типа «зашивки», электродов – инструментов для электрохимической обработки.

В ОАО НИАТ разработка технологии лазерного послойного синтеза началась с создания в 2005 г. отечественной технологии листового послойного синтеза типа LOM.

Технология создавалась одновременно с параллельной разработкой совместно с Научно-исследовательским кинофотоинститутом (НИКФИ, г. Переславль-Залесский) российского листового материала на базе картографической бумаги толщиной около 100 мкм и термостойкого слоя типа латекса. ТПС из листовых материалов разрабатывалась на базе программной системы «Китеж». Таким образом, были созданы: технологическое программное обеспечение, установка модели УПС-800 и листовый материал, превосходящие западные аналоги по техническим параметрам и существенно дешевле по стоимости.

Установка модели УПС-800 и типовые изделия представлены на рис. 1.

Применение технологии лазерного послойного синтеза значительно сократило цикл подготовки производства вышеупомянутых новых изделий.

Следующей важной разработкой явилась экспериментальная установка лазерного послойного синтеза из металлических и керамических порошков. Эта установка модели АТК и полученные на ней изделия представлены на рис. 2. Они предназначены для Московского



Рис. 1. Модель УПС-800:

a – общий вид; *б* – типовые детали, изготовленные ТПС из листовых материалов

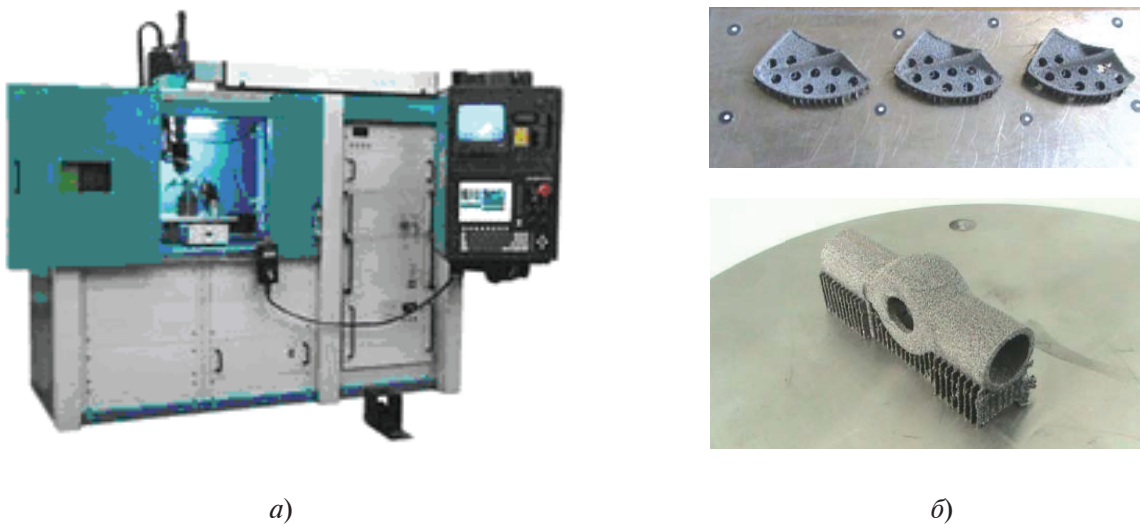


Рис. 2. Модель ATK:

a – общий вид; *б* – полученные изделия

машиностроительного предприятия им. В.В. Чернышева и Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ) им. профессора Н.Е. Жуковского.

Характерной особенностью применения лазерных ТПС было значительное сокращение (в 3–5 раз) времени подготовки производства основных изделий и оснастки сложных форм, повышение их качества и точности.

В настоящее время в ОАО НИАТ имеются возможности высокоточного моделирования на мощном компьютере и изготовления основных узлов и деталей компактной энергетической установки методом ТПС из порошковых материалов, еще недавно недоступных для ТПС и традиционных технологий.

На рис. 3, *a* представлены макеты турбины и соплового аппарата холодной энергетической установки, выполненные из алюминиевого порошкового материала в ОАО НИАТ.

На рис. 3, *б* помещены основные детали и узлы компактной энергетической установки.

На рис. 3, *г* представлен макет керамической турбины компактной когенерационной (с теплообменником) энергетической установки.

На рис. 4 представлена математическая модель корпуса компактной энергетической установки, выполненная на мощном компьютере с оперативной памятью 16 Гбайт.



Рис. 3. Основные узлы и детали компактной энергетической установки:

a – макет керамической турбины, изготовленной методом ТПС;
б – комплект деталей компактной энергетической установки; *в* – макет керамической турбины

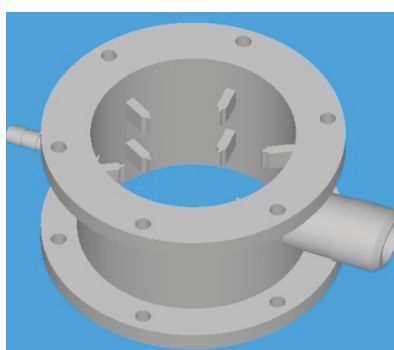


Рис. 4. Математическая модель корпуса компактной энергетической установки

В результате патентного поиска Россия, по данным Роспатента, является лидером в данной области, ОАО НИАТ лидирует в части разработок патентов в России в рассматриваемой области:

1. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации и ОАО НИАТ – Патент на изобретение № 2386517 от 20 апреля 2010 г. Авторское право принадлежит авторам Сироткину О.С., Рыцеву С.Б., Тимофееву А.И., Филиппову Е.И. (ОАО НИАТ).

2. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации – Патент на изобретение № 2450891 от 20 мая 2012 г. Авторское право принадлежит С.Б. Рыцеву, А.И. Тимофееву, Е.И. Филиппову, А.М. Левину (ОАО НИАТ).

ООО «Центр Бойко» более 20 лет проявляет себя в качестве основного разработчика компактных энергетических установок в области создания перспективных конструктивных керамических материалов, а также проектирования, изготовления и испытания керамических деталей и узлов для высокоэффективных газотурбинных двигателей (ГТД). За это время коллективом ученых и инженеров ООО «Центр Бойко» были разработаны и созданы:

– основы научного проектирования керамических деталей высокотемпературного тракта керамического газотурбинного двигателя (турбина, камера сгорания, воздухоподогреватель, газоходы и др.);

– не имеющие аналогов конструктивные керамические материалы для получения деталей прессованием, обладающие термостойкостью свыше 1350 °С, не имеющие усадки при спекании (а значит, допускающие механическую обработку без использования алмазного инструмента), позволяющие применять такие технологические операции, как сварка и электроэрозия.

С 2006 г. ООО «Центр Бойко» ведет работы в области создания лазероспекаемых керамических материалов и технологии изготовления из них деталей сложной формы с обеспечением заданных свойств. За это время созданы:

- технологический комплекс, позволяющий изготавливать керамические наноструктурированные порошки с контролем их свойств на каждом технологическом этапе;
- исследовательская лаборатория с оригинальными испытательными установками и стендами имитации натуральных условий работы ГТД.

На сегодняшний день создана уникальная алюмоборнитридкремниевая порошковая композиция с легирующими нанодобавками, позволяющая методом лазерного синтеза изготавливать безупрочные керамические детали, с рабочей температурой 1350 °С.

За последние годы коллективом разработчиков опубликовано более 30 работ, получено 6 патентов в области применения керамических материалов в современных ГТД, в том числе:

- патент РФ на изобретение № 2227850 от 27 апреля 2004 г. «Туннельный нанотурбокомпрессор». Авторское право принадлежит ООО «Центр Бойко»;
- патент на изобретение № 2204021 от 2 мая 2003 г. «Квазиadiaбатный керамический сопловой аппарат высокотемпературной газовой турбины». Авторское право принадлежит ООО «Центр Бойко».

ОАО НИАТ и ООО «Центр Бойко» с помощью своих технических и программных средств способны разрабатывать и изготавливать действующие макеты основных деталей и узлов перспективных компактных когенерационных энергетических установок (ККЭУ) и холодных энергетических установок (ХЭУ).

ККЭУ и ХЭУ – энергетические установки, мощностью до 3 кВт и величиной удельной массовой мощности 0,35 – 0,5 кВт/кг.

Это означает, что микроэнергетическая установка мощностью 3 кВт будет весить примерно 6 кг и менее.

После разработки и изготовления макетных образцов в рамках исследований по теме будут изготовлены опытно-промышленные образцы: ККЭУ и ХЭУ.

В ККЭУ сжигается 0,144 г/с природного газа с выработкой до 2-х кВт электроэнергии и еще 5-и кВт тепловой энергии.

ХЭУ использует перепад с 3 бар до 1–2 бар природного газа на городских газораспределительных подстанциях – без затрат газа. Вырабатывается до 1 кВт электроэнергии.

Себестоимость ККЭУ – 50,4 тыс. руб. Ожидаемый уровень цен на новую продукцию – 70 тыс. руб.

Стоимость модели EU20i (2 кВт) фирмы Honda (Япония) с двигателем внутреннего сгорания, работающем на бензине, составляет 60 тыс. руб.

Кстати, расход бензина модели EU20i – 0,22 г/с или 800 г/ч, выработка дополнительной тепловой энергии разработчиками двигателя фирмы Honda не предусмотрена.

Сопоставление технических характеристик ККЭУ и микрогенератора модели EU20i фирмы Хонда (Япония) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение ККЭУ и модели EU20i

Модель микрогенератора	Расход топлива, г/с	Массовая удельная мощность, кВт/кг	Электрическая мощность, кВт	Ресурс, ч	Стоимость эксплуатации, руб./ч
ККЭУ	0,144	0,35	2,0	20 000	10,36
EU20i	0,22	0,067	2,0	10 000	22,18

Таблица 2

Данные потребления электроэнергии различной бытовой техники дачного дома

Вид бытовой техники	Мощность, Вт	Использование в месяц, ч	Потребление в месяц, кВт·ч	Пояснение
Освещение	90	$4 \cdot 30 = 120$	10,8	3 лампочки по 30 Вт, освещающие по 4 ч в день
Компьютер/ноутбук	180/90	$8 \cdot 22 + 2 \cdot 8 = 192$	34,6/17,3	Если использовать для работы 8 ч и 2 ч по выходным
Насос для воды «Малыш»	280	13	3,7	Качает 450 л/ч, расход воды — 6 тыс. л в месяц
Холодильник	300	постоянно	17	≈200 кВт·ч в год
Система для подогрева воды (бойлер)	2000	Нагрев: $30 \cdot 1,383 = 41,5$	Нагрев: $41,5 \cdot 2 = 83$ Поддержание: $30 \cdot 1,11 = 33,3$ Всего: 116,3	Расход горячей воды — 50 л в день, нагревается за 83 мин (1,383 ч) плюс 1,11 кВт·ч в сутки на поддержание температуры
Стиральная машина	2200	10 стирок	10	1 кВт·ч за стирку
Утюг	1400	2	2,8	
Чайник	2000	2	4	
Швейная машина	80			Бывают с двигателем на постоянном токе и меньшей мощности (30 Вт)
Дрель	650			

Из табл. 1 следует, что стоимость эксплуатации ККЭУ меньше стоимости эксплуатации микрогенератора модели EU20i фирмы Хонда в 2,14 раза.

Целесообразность применения ККЭУ мощностью до 3 кВт представлена в табл. 2.

Общее потребляемое количество электроэнергии — 200 кВт·ч в месяц с мощностью в 2–3 кВт.

Перспективной областью применения ККЭУ может быть и энергетически самодостаточная экологичная система водоочистки с нулевым энергопотреблением, представленная на рис. 5.

I — система грубой очистки вод: 1 — вход сточных вод, 2 — отстойник, 3 — насос сточных вод, 4 — песколовка, 5 и 6 — жиरो- и топливоволушки (второй ступени), 7 — насос, 8 — осветленная вода (степень очистки 90 %).

II — система тонкой очистки сточных вод: 8 — вход в резервуар озонирования, 9 — озонатор, 10 — генератор CO₂, 11 — раствор CO₂ в H₂O, 12 — насос.

III, IV, V — системы биологической доочистки: 13 — фильтры, 14 — вход (CO₂ в H₂O) в резервуар активного ила (окситенк), 15 — воздух, 16 — насос, 17 — резервуар активного ила, 18 — раствор CO₂ в H₂O, 19 — насос, 20 — облучатели, 21 — фотобиореактор (ФБР), 22 — водная суспензия хлореллы размером 8 — 10μ, 23 — насос, 24 — мельница, 25 — водная суспензия дроблений хлореллы (до размера 2 микрона), 26 — насос, 27 — емкость анаэробного сбраживания (метатенк), 28 — отвод CO₂ от метатенка в ФБР, 29 — отвод очищенной воды в биопруд, 30 — биопруд, 31 — эйхорния, 32 — выход питьевой воды.

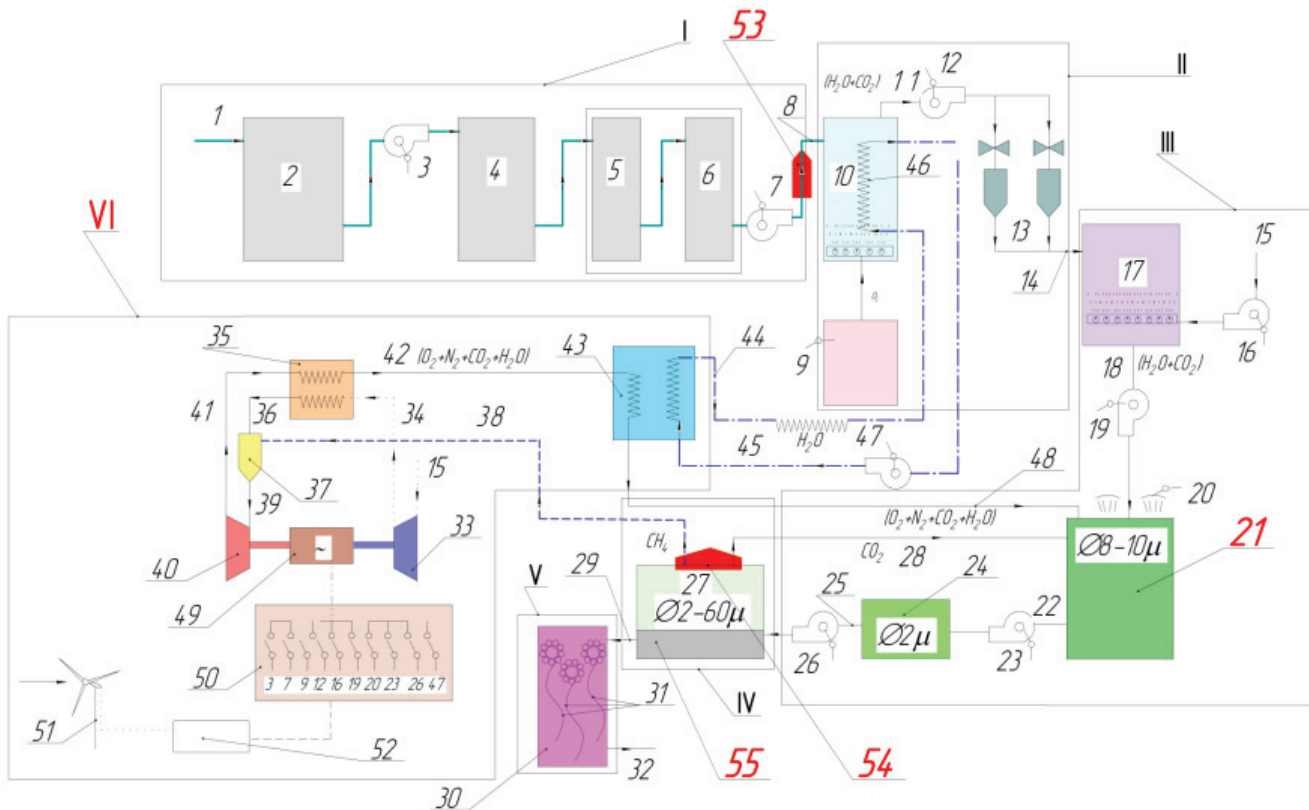


Рис. 5. Принципиальная схема установки водоочистки

VI – блок энергообеспечения: 33 – компрессор, 34 – сжатый воздух, 35 – воздухоподогреватель, 36 – сжатый нагретый воздух, 37 – камера сгорания, 38 – подвод метана в камеру сгорания, 39 – подвод рабочего газа в турбину, 40 – турбина, 41 – подвод греющего газа, 42 – отвод греющего газа, 43 – водяной котел, 44 – горячая теплофикационная вода, 45 – обратная холодная вода, 46 – нагреватель смеси ($H_2O - CO_2$), 47 – насос теплофикационной воды, 48 – выхлопная смесь ($O_2 - N_2 - H_2O$), подвод в ФБР, 49 – электрогенератор, 50 – щит электропитания насосов, облучателей, озонатора и т. д., 51 – ветрогенератор мощностью 1,5–2 кВт, 52 – генератор, 53 – керамический фильтр, 54 – молекулярный керамический фильтр, 55 – макропористая керамика.

С развитием рационального природопользования большее распространение получает все, что связано с концепцией «green industry», в частности, защита водных ресурсов и их рациональное использование.

Становятся известными результаты исследования энергосберегающей пятиступенчатой системы очистки с качеством воды на выходе, соответствующим требованиям, предъявляемым к воде, используемой для рыбоводства; и с получением газообразного топлива в количестве, достаточном для получения электрической и тепловой энергии с электрическим КПД не ниже 28 %.

Для биологической доочистки (III–V ступени системы) используются аэробные и анаэробные микроорганизмы и водоросли. В процессе их взаимодействия выделяется метан в количестве достаточном для обеспечения электрической и тепловой энергией всего очистного оборудования системы. Реализация энергетической самодостаточности системы стала возможной только после внедрения целого ряда инновационных разработок:

- комплекса нанопористых керамических фильтров, в 3 раза увеличившего эффективность и скорость грубой и тонкой очистки;

- комплекта макропористых керамических носителей, многократно повышающих количество выделяющих смесь газов ($70\% \text{CH}_4 + 30\% \text{CO}_2$) анаэробных микроорганизмов;
- системы «питания» одноклеточной водоросли «хлорелла», удваивающей массу за 24 часа;
- мультимодульного энергоблока на основе керамических высокоэкономичных (КПД $28 \pm 1\%$) экологически чистых ($\text{NO}_x \leq 5 \text{ ppm}$, $\text{CO} \leq 5 \text{ ppm}$, $\text{O}_2 = 15\%$) газовых микротурбомашин, непрерывно обеспечивающих всю систему очистки необходимым количеством тепла и электроэнергии.

Показана реальная возможность создания энергетически самодостаточного комплекса по сверхтонкой очистке сточных вод. Была изготовлена и экспериментально проверена в течение двух лет лабораторная установка, состоящая из:

- блока водоочистки с качеством на уровне требований рыбоводства;
- блока выработки топлива и переработки выхлопных газов;
- блока когенерации, снабжающего блок водоочистки тепловой и электрической энергией.

В связи с непрерывным ростом энергопотребления и ограниченным запасом углеводородного топлива с каждым годом становится все более востребованным использование вторичных источников энергии. Среди них важное место занимает проблема применения энергии избыточного давления газа на объектах газопотребления, газораспределения и магистральных газопроводов. Газ, идущий к потребителю при более низком давлении, чем в магистральном газопроводе, подвергается редуцированию на этих объектах. Применение турбодетандерных установок с встроенным электрическим генератором позволяет осуществить редуцирование газа с одновременной выработкой дополнительной электроэнергии. Такой тип установок называется ХЭУ.

По данным, которые рассчитаны исходя из потребности рынка, общее количество установок типа ККЭУ в России должно составлять 540–740 тыс. единиц на ближайшие 5–8 лет.

По проекту намечено разработать несколько новых керамических порошков с нанодобавками с новыми технологиями лазерного послойного синтеза. Проект направлен на создание и производство керамических установок для автономного теплоэнергоснабжения. Они заполняют имеющуюся нишу в отечественной энергетике с выделением их в отдельный класс энергогенерирующего оборудования мощностью до 3 кВт. Имеется значительная потребность в источниках энергии для целого ряда отдаленных объектов, в том числе магистральных газо- и нефтепроводов, индивидуальных хозяйств, применения в оборонной промышленности в качестве автономных источников энергии, резервной энергетике для больниц, сельских школ, МЧС и др.

В этом случае альтернативным решением, исключающим значительные затраты на передачу энергии, является создание и применение экологичной компактной мобильной энергетической установки.

Формализованное описание комплекса научно-технических (технологических) задач, которые должны быть решены в результате проведения исследований по предлагаемой теме, представлено на рис. 6.

Компактная когенерационная энергетическая установка предназначена для выработки тепловой и электроэнергии за счет сжигания природного газа. В проекте будут разработаны технологические процессы изготовления основных деталей и изделий газовой турбины из керамических порошковых материалов. Основу будут составлять ТПС из керамических порошков с нанодобавками.

В настоящее время созданы макетные образцы основных узлов микротурбины и теплообменника, связанного с накопителем тепловой энергии.

Получен первый образец керамического порошкового материала, который спекается лазерным лучом технологией лазерного послойного синтеза.

Необходимо разработать 2–3 новых керамических материала с нанодобавками и с улучшенными характеристиками. На базе разрабатываемой математической модели теплообмена технологии лазерного послойного синтеза предстоит рассчитать и отработать техно-



Рис. 6. Формализованное описание научно-технических задач

логические параметры. Отработать и довести конструкцию компактной когенерационной энергетической установки. Для работ по спеканию и формообразованию керамических порошков в ОАО НИАТ имеется оборудование для ТПС. Однако для выполнения и завершения работ по теме необходимы: модернизация существующего оборудования и создание экспериментальной установки для тестирования новых технологий и образцов изделий, а также создание нового технологического программного обеспечения.

С целью реализации получения необходимых компонентов для изготовления керамических порошков освоение предполагаемых к внедрению технологий должно обеспечиваться горнодобывающей, горнообработывающей отраслями, химической промышленностью.

Машиностроительная и приборостроительная промышленность могли бы обеспечить возможность импортозамещения таких устройств, как: планетарные мельницы, специальное прессовое оборудование, печи, смесители, дозаторы, сепарационное оборудование, обрабатывающие станки для доводки керамических деталей, средства контроля и измерения.

Необходимыми являются разработка и внедрение отечественного оборудования лазерной ТПС, так как зарубежное оборудование не предназначено для ТПС из керамических порошковых материалов.

Изготовление керамического порошка для лазерного ТПС может быть освоено в НТЦ «Бакор» (г. Щербинка Московской обл.); выпуск керамических турбин – на производстве ОАО НИАТ, МАИ, ОАО «Рыбинские моторы» (г. Рыбинск Ярославской обл.).

Для деталей и узлов, которые изготавливаются из нержавеющей стали и других металлических материалов, механообрабатывающие заводы МАИ, НИАТ и «Рыбинские моторы» имеют необходимое станочное оборудование.

Технологические процессы сборки и испытаний будут организованы в ОАО НИАТ и в ООО «Центр Бойко».

После разработки и изготовления макетных образцов в рамках исследований по теме будут изготовлены опытно-промышленные образцы компактных энергетических установок – ККЭУ и ХЭУ.

Исследования по теме формируют условия для научно-технического прорыва, потенциала для опережающего инновационного развития и соответствуют мероприятию проекта ФЦП на 2012–2020 годы 2.1.4.9 «Энергоэффективное оборудование для производства тепловой и электрической энергии» и, в целом, вносят вклад в подтверждение и укрепление статуса России как мировой научной державы.

Технико-экономическая эффективность ККЭУ обеспечивается высокими характеристиками, которые стали возможными благодаря проведению исследований и разработкам новых ТПС и цифрового формообразования с применением новых порошковых материалов с нанодобавками.

Основные технико-экономические данные запуска ККЭУ с 2015 г. в серийное производство следующие:

Доходы от продаж ККЭУ – 7070,77 млн руб.

Чистая прибыль – 1583,86 млн руб.

Срок окупаемости проекта составляет:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{K}{P} = \frac{5090,95}{1583,86} = 3,21 \text{ года}, \quad (1)$$

где K – затраты, P – прибыль.

Перспективы серийного изготовления и приобретения ККЭУ будут востребованы многими отраслями в ближайшие годы, так как они начнут интенсивную модернизацию и развитие своих автономных средств энергетики на различных объектах.

Выводы. ОАО НИАТ и ООО «Центр Бойко» имеют достаточный научно-технический задел и высокий профессиональный уровень специалистов для разработки проекта.

Впервые для керамической компактной когенерационной энергетической установки разрабатывается технология изготовления ответственных деталей, в числе: турбины, соплового аппарата, теплообменника, камеры сгорания с определением оптимальных технологических параметров на базе лазерного послойного синтеза и технологическая продукция с уникальными характеристиками, не имеющая функциональных аналогов на мировом рынке.

Развитие производства ККЭУ целесообразно проводить во взаимодействии с планами ввода в эксплуатацию газопроводов и систем Газпрома.

Предлагаемый проект с разработкой новой технологии для создания ККЭУ, предназначенной для применения в качестве автономного источника тепловой и электроэнергии мощностью до 3 кВт, даст возможность заполнить нишу в энергетике, ориентированную на индивидуальные хозяйства, для целого ряда отдаленных объектов, в том числе магистральных газо- и нефтепроводов, применения в оборонной промышленности в качестве автономных источников энергии, резервной энергетике для больниц, сельских школ и др. [5].

Потребность в керамических компактных когенерационных энергетических установках с ресурсом 20 000 ч подтверждается существованием мирового рынка микрогенераторов на базе двигателей внутреннего сгорания, имеющих более низкие характеристики, что подтверждает актуальность проведения исследований по предлагаемому проекту.

Список литературы

1. **Сударев А.В., Молчанов А.С., Конаков В.Г.** Высокоэффективные и экологически чистые модульные системы на основе керамических установок // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 3.
2. **Сироткин О.С., Тарасов Ю.М., Рыцев С.Б.** Прототипирование и технология послойного синтеза в современном компьютеризированном производстве // Российская энциклопедия GALS. Авиационно-космическое машиностроение. НИЦ АСК. М. 2008.
3. **Сироткин О.С., Рыцев С.Б., Левин А.М.** Опыт применения порошковых материалов в технологии лазерного послойного синтеза // Авиационная промышленность. 2012. № 4.
4. **Конаков В.Г., Курапова О.Ю., Борисова Н.А. и др.** Зависимость физико-химических свойств и размеров прекурсоров оксидной керамики на основе твердых растворов диоксида циркония от способа синтеза // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4: физика, химия. № 32011.
5. **Рыцев С.Б.** Автоматизация проектирования и производства с использованием технологий быстрого прототипирования // Авиационная промышленность. 2000. № 10.