

**Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0213 от «29» сентября 2016 г.  
Тема проекта: Разработка и экспериментальная апробация научно-технических решений по созданию транспортной энергоустановки на базе комбинированного теплового двигателя.**

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 29.09.2016 г. № 14.577.21.0213 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 2 «Разработка элементной базы микротурбины мощностью 50 кВт с эффективным КПД 37-39% и экспериментальные исследования макетов высокоэффективного теплообменника и малотоксичной камеры сгорания» в период с 29.09.2016 г. по 30.12.2017 г. были получены следующие научно-технические результаты:

**-результаты полученные при выполнении работ Московским политехом:**

- 1) Разработаны алгоритм и программная документация на программу ЭВМ теплогидравлического расчета теплопередающей матрицы и системы охлаждения каркаса роторного теплообменника, обеспечивающую снижение утечек через уплотнения теплообменника.
- 2) Выполнены проектный теплогидравлический расчет роторного теплообменника со степенью регенерации 95% и потерями давления на газовой и воздушной сторонах 5423 Па (5,3%) и 1905 Па (0,6%) соответственно. Теплообменник имеет диаметр 560 мм и толщину 150 мм.
- 3) Выполнено математическое моделирование теплогидравлических процессов в роторном теплообменнике со сверхвысокой степенью регенерации (95%). Полученные результаты по степени регенерации и потерям давления достаточно близко совпали с проектным расчетом.
- 4) Разработан каркас роторного теплообменника, обеспечивающий высокую эффективность работы уплотнений теплообменника. Разработанный каркас включает два плоских диска толщиной 4 мм (по дискам работают уплотнения теплообменника) и выполненные из тонкостенной стали (2 мм) стаканы-ячейки. Разработанная система охлаждения каркаса обеспечивает, как показало проведенное математическое моделирование его теплового состояния, снижение максимальной температуры каркаса до 430<sup>0</sup>С и как следствие снижения в нем температурной неравномерности. Выполненное математическое моделирование теплонапряженного состояния каркаса показало, что тепловые деформации каркаса в направлении его оси вращения меньше 0,8 мм, что соответствует техническим требованиям соглашения и обеспечит высокую эффективность работы уплотнений.

- 5) Разработаны технические документации на макет роторного теплообменника и стенда для его испытаний.
- 6) Разработаны программа и методики испытаний высокоэффективного теплообменника и проведены его испытания. Получено близкое совпадение полученных и проектных значений степени регенерации и потерь давления роторного теплообменника. Полученные значения степени регенерации и потерь давления соответствуют требованиям Соглашения по пункту 4.2.2.
- 7) Разработаны в соответствии с план-графиком работ проект «Требования к работам и их результатам на ОКР по микротурбине мощностью 50 кВт» и проект «Техническое задание на проведение ОКР высокоэффективной микротурбины мощностью 50 кВт».
- 8) Проведено дополнительное патентное исследование показавшее, что только российский рынок в период 2019-2023 г. составляет 23000 микротурбинных установок. При стоимости микротурбинной установки 50 кВт равной 1.400.000 руб (удельная стоимость 430 \$/кВт) объем российского рынка в рублях составляет 32,2 млрд руб.
- 9) Разработана микротурбина мощностью 50 кВт с эффективным КПД 37-38%. Такой КПД обеспечивает разработанной микротурбине возможность конкуренции по топливной экономичности с поршневыми ДВС аналогичной мощности, имеющими эффективный КПД 34-36% .
- 10) Разработано техническое предложение на микротурбину мощностью 50 кВт. Выбранная конструктивная схема микротурбины - одновальная, с роторным дисковым теплообменником, трубчатой малотоксичной камерой сгорания, с консольно установленными на валу центробежным компрессором и радиальной турбиной. Проведены оценочные расчеты подтверждающие реализуемость получения заданных показателей микротурбины и ее работоспособности.
- 11) Разработаны технические решения и методы проектирования роторного теплообменника со сверхвысокой степенью регенерации. В частности показано, что в таких теплообменниках матрица должна быть щелевой, а сам теплообменник каркасным, причем каркас должен быть охлаждаемым. Последнее обеспечивает высокую эффективность работы уплотнениям теплообменника, что в силу больших размеров теплообменника с эффективностью 95% весьма важным.
- 12) Показано, что использование цикла со сверхвысокой степенью регенерации тепла обеспечивает микротурбинам (до 100 кВт) повышение эффективного КПД до 37-38% при максимальной температуре цикла не превышающей освоенной (950<sup>0</sup>С) в выпускаемых в настоящее время микротурбинах.
- 13) Разработаны технические документации на макет роторного теплообменника и стенда для его испытаний.

**-результаты работ выполненных иностранным партнером (университет Цинхуа, г. Пекин, Китай):**

1) Выполнены газодинамический и прочностной расчеты колес центробежного компрессора и радиальной турбины для микротурбины мощностью 50 кВт, а также выполнено их профилирование.

2) Проведено математическое моделирование течений в проточной части центробежного компрессора и радиальной турбины. Получены величины эффективности разработанных компрессора и турбины. Их значения следующие: адиабатический КПД по полным параметрам компрессора 80%; КПД турбины по полным параметрам 89%.

3) Выполнен прочностной расчет рабочих колес турбины и компрессора. Рабочее колесо удовлетворяет требованиям статической прочности (коэффициент запаса  $n > 2.5$ ), и долговечности при наработке на номинальном режиме 40000 часов. ( $n > 1.3$ ). Рабочее колесо компрессора удовлетворяет требованиям прочности (коэффициент запаса  $n > 2.5$ ), при наработке 30000 часов на номинальном режиме коэффициент запаса составляет ( $n > 1.15$ ).

4) Выполнены прочностные расчеты моментной втулки и вала ротора. Моментная втулка и шлицевые соединения ротора удовлетворяют требованиям прочности. Вал ротора спроектирован на требуемые нагрузки и удовлетворяет требованиям долговечности (коэффициент запаса  $n_{дин} > 2.8$ ).

5) Разработаны опоры ротора турбокомпрессора.

6) Динамический анализ ротора показал, что критические частоты вращения ротора лежат вне рабочего режима микротурбины. Частота вращения по первой критической частоте (первая мода ротора) 2523. об/мин, следом идет крутильная частота вращения (без учета усилий с выходной муфты) и составляет 4127 об/мин, по второй моде колебаний ротора критическая частота вращения находится вне диапазона режимов работы микротурбины.

6) Проведено математическое моделирование объемного, вязкого течения в проточных частях центробежного компрессора и радиальной турбины.

7) Определены адиабатический коэффициент полезного действия (КПД) по полным параметрам компрессора и КПД по полным параметрам турбины. Их значения для компрессора и турбины составили 80% и 89% соответственно.

8) Разработана малотоксичная камера сгорания с обогащённо-обеднённым диффузионным сгоранием. Разработана 3D модель камеры сгорания.

9) Выполнено моделирование процессов объемного вязкого течения и горения метана в разработанной малотоксичной камере сгорания.

10) Полученные из результатов математического моделирования выбросы окислов азота, окиси углерода и неравномерность температурного поля составляют 7,3 ppm, 6,5 ppm

и 27К соответственно.

11) Полученные гидравлические потери в камере сгорания не превышают 1,2%.

12) Разработана программа и методика экспериментального исследования макета камеры сгорания.

13) Проведено экспериментальное исследование макета малотоксичной камеры сгорания на номинальном и частичных режимах. Полученные выбросы окислов азота и неравномерность температурного поля на номинальном режиме составляют 8,1 и 21 К соответственно, что соответствует требованиям Соглашения о предоставлении субсидии.

Работа по этапу 2 выполнена в полном объеме в соответствии с утвержденным техническим заданием и планом-графиком соглашения № 14.583.21.0013 от «11» ноября 2015 г. о предоставлении субсидии Министерством образования и науки Российской Федерации.