

Разработка методов интенсификации теплообмена в системах охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин и технологий опережающей верификации теплогидравлических моделей

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0210 от 28 сентября 2016 г. 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 № 3 в период с 1 января 2018 г. по 31 декабря 2018 г. выполнены следующие работы:

1) Проведен анализ существующих разработок по верификации гидравлических и тепловых моделей систем охлаждения лопаток газовых турбин.

2) Разработана технология опережающей верификации гидравлической и тепловой модели лопаток газовых турбин.

3) Разработаны тестовые математические модели гидравлической и тепловой модели лопаток газовых турбин.

4) Разработаны теоретические основы верификации гидравлической и тепловой модели лопаток газовых турбин.

5) Разработаны экспериментальные стенды для проведения аэродинамических и тепловых испытаний систем охлаждения лопаток газовых турбин.

6) Разработаны ЭКД на экспериментальные стенды для проведения аэродинамических и тепловых испытаний систем охлаждения лопаток газовых турбин.

7) Разработаны ЭКД экспериментальной модели аэродинамической системы охлаждения лопаток газовых турбин и ЭКД экспериментальной модели лопатки для тепловых испытаний.

8) Разработаны программы и методики проведения аэродинамических и тепловых испытаний системы охлаждения лопатки газовой турбины.

9) Изготовлены экспериментальные стенды для проведения аэродинамических и тепловых испытаний систем охлаждения лопаток газовых турбин

10) Изготовлены экспериментальные модели для аэродинамических и тепловых испытаний систем охлаждения лопаток газовых турбин.

11) Проведены аэродинамические и тепловые испытания систем охлаждения лопаток газовых турбин.

12) Проведены верификации разработанных гидравлических и тепловых математических моделей данными эксперимента.

13) Разработаны методики верификации гидравлических и тепловых математических моделей данными экспериментов.

14) Разработаны предложения и рекомендации по реализации результатов ПНИЭР и вовлечению их в хозяйственный оборот.

15) Разработан проект технического задания на проведение ОКР по теме: «Высокоэффективные лопатки газовых турбин с применением новых систем интенсификации теплообмена.

16) Проведено обобщение и оценка результатов проекта.

В ходе реализации проекта с целью совершенствования процесса проектирования теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей была разработана методика опережающей верификации тепловых и гидравлических моделей, базирующаяся на испытании полноразмерных прототипов, изготавливаемых по технологии селективного лазерного спекания (SLM-технологии). Разработанная технология опережающей верификации теплогидравлических моделей позволяет сократить время проектирования охлаждаемой лопатки на 47%. Столь значительного сокращения сроков удалось достигнуть благодаря применению комплекса методик, позволяющих получить экспериментально апробированный вариант конструкции лопатки до выпуска рабочей документации. Технология включает разработку прототипа лопатки на ранних стадиях

проектирования с использованием метода численного моделирования в современных программных пакетах, ее изготовление с использованием SLM-технологий и проведение экспериментальных исследований с целью получения требуемых теплогидравлических характеристик. Основное отличие от традиционной методики проектирования заключается в отсутствии экспериментальной доводки конструкции лопатки после выпуска рабочей документации и ее изготовления в серийном производстве.

С использованием предложенной методики проектирования было разработано четыре новых высокоэффективных метода интенсификации теплоотдачи в зоне входной кромки, в щелевом канале выходной кромки и радиальных каналах срединной части пера конвективно охлаждаемых лопаток.

В результате проведенных многопараметрических численных расчетов и экспериментальных исследований разработана конструкция закрытого циклона для охлаждения входной кромки. Получены критериальные зависимости для расчета локальных и средних коэффициентов теплоотдачи и гидравлических потерь. Экспериментальные данные подтвердили результаты расчетов и показали, что применение закрытой циклонной системы при числе Рейнольдса $Re > 55\ 000$ позволяет обеспечить в критической точке входной кромки число Нуссельта $Nu > 450$. На разработанный метод интенсификации струйного теплообмена получен патент на изобретение № 2663966 от 14.11.2017 г. «Охлаждаемая лопатка соплового аппарата газовой турбины», РФ; подана заявка на изобретение № 2018139934 от 13.11.2018 г. «Охлаждаемая лопатка газовой турбины», РФ.

Для выравнивания тепловой неравномерности профиля лопатки газовой турбины разработан новый несимметричный метод организации течения теплоносителя в радиальных каналах. Несимметричный метод интенсификации позволяет обеспечить: коэффициент несимметричности $K_k = 1,3-1,4$, коэффициент теплогидравлической эффективности $\eta = 1,48$, относительное число Нуссельта $N/Nu_0 = 3,5-4$ (со стороны струй), число Нуссельта более 300 при числе Рейнольдса $Re > 36\ 000$. Было установлено, что организацию несимметричного охлаждения рационально осуществлять в каналах с соотношением сторон $C/d_k = 1$. При формировании системы несимметричного охлаждения наиболее оптимально является применение отверстий в перегородке $b_{отв} = 2 \cdot h$ (где h – высота ребра). В процессе тепловых испытаний моделей системы несимметричного охлаждения экспериментально подтверждена ее эффективность.

Для области выходной кромки разработан новый штырьково-луночный турбулизатор потока в щелевом канале, позволяющий повысить средний коэффициент теплоотдачи по сравнению с традиционными турбулизаторами на 15-20% в диапазоне чисел Рейнольдса от 4000 до 80000. При числе Рейнольдса в канале более 125 000 разработанный штырьково-луночный интенсификатор обеспечивает число Нуссельта больше чем $Nu = 350$. Применение данного типа турбулизаторов потока в виде шахматного пучка в области выходной кромки лопаток высокотемпературных газовых турбин позволяет снизить расход на охлаждение на 5-8% и повысить КПД газовой турбины на 0,2-0,3%. Также для области выходной кромки был разработан новый турбулизатор потока «штырьки в траншеях», позволяющий повысить средний коэффициент теплоотдачи в охлаждающем канале по сравнению с традиционным турбулизатором (штырьком) на 30-36% в диапазоне чисел Рейнольдса от 4 000 до 80 000. Установка данного типа турбулизаторов в виде шахматного пучка в области выходной кромки лопаток позволяет снизить расход на охлаждение лопаток на 22-25% и повысить КПД газовой турбины на 0,3-0,4%. На разработанный метод интенсификации теплообмена подана заявка на изобретение № 2018139933 от 13.11.2018 г. «Охлаждаемая лопатка газовой турбины».

Апробация разработанной методики проектирования теплонапряженных деталей была проведена при разработке системы охлаждения рабочей лопатки первой ступени

газотурбинной установки фирмы Siemens с целью импортозамещения деталей ее горячей части.

При проектировании использованы перечисленные выше методы интенсификации теплообмена. Были разработаны математические гидравлические и тепловые модели разработанной лопатки, которые верифицированы результатами испытаний прототипа лопатки на созданных в рамках проекта экспериментальных стендах для тепловых и гидравлических испытаний:

1) Экспериментальный стенд для исследования конвективного охлаждения лопаток газовых турбин: позволяет получать коэффициенты теплоотдачи экспериментальных моделей с использованием метода калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Съем данных о результатах эксперимента осуществляется при помощи оптической измерительной машины (3D-сканера) со специальным поворотным столом.

2) Экспериментальный стенд для тепловых испытаний струйного охлаждения лопаток газовых турбин: позволяет получать температурные поля экспериментальных моделей с помощью тепловизионной съемки.

3) Экспериментальный стенд для аэродинамических испытаний систем охлаждения лопаток газовых турбин: позволяет получать расходную характеристику систем охлаждения лопаток газовых турбин и значения давлений не менее чем в шести точках внутренней полости лопаток.

4) Экспериментальный стенд для тепловых испытаний моделей лопаток газовых турбин: позволяет получать температурные поля и коэффициенты теплоотдачи экспериментальных моделей охлаждаемых лопаток с помощью тепловизионной съемки.

Совокупность полученных в процессе реализации проекта результатов легли в основу технического задания на проведение соответствующих опытно-конструкторских работ и в разработанные предложения и рекомендации по внедрению результатов в хозяйственный оборот.

В целях коммерциализации (практического использования) результатов интеллектуальной (научно-технической) деятельности, полученных в рамках проекта, в соответствии с договором о софинансировании и дальнейшем использовании результатов исследований (проекта) от 22 сентября 2016 г. с индустриальным партнером ОАО «НПО ЦКТИ» заключен лицензионный договор на полученный и зарегистрированный результат проекта, созданный за счет средств субсидии (патент на изобретение № 2663966 от 14.11.2017 г. «Охлаждаемая лопатка соплового аппарата газовой турбины», РФ).

По результатам экспертизы поданных заявок на изобретения (№ 2018139933 от 13.11.2018 г. «Охлаждаемая лопатка газовой турбины», РФ; № 2018139934 от 13.11.2018 г. «Охлаждаемая лопатка газовой турбины», РФ) планируется заключение с индустриальным партнером еще двух лицензионных договоров.

Индустриальный партнер планирует использовать разработанные в рамках проекта системы интенсификации и методики верификации гидравлических и тепловых моделей при проектировании высокотемпературных лопаток газовых турбин с целью выхода на рынок ремонтных комплектов для зарубежных газотурбинных двигателей мощностью до 52 МВт.

Оценка элементов новизны результатов работ

В рамках проекта были проведены численные и экспериментальные исследования разработанных и запатентованных систем интенсификации конвективного и струйного теплообмена для различных областей пера охлаждаемой лопатки, для которых созданы новые корреляционные зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса. Все разработанные методы интенсификации легли в основу системы охлаждения рабочей лопатки первой ступени газовой турбины стационарной ГТУ, отличающейся большей степенью охлаждения и меньшей неравномерностью температурного поля.

Оценка соответствия полученных результатов работы техническим требованиям к выполнению проекта, и оценка перспектив продолжения проекта

Все обозначенные в плане-графике работы выполнены в полном объеме. Полученные результаты полностью соответствуют требованиям технического задания. Перспективы продолжения работы заключаются в проведении опытно-конструкторских работ (ОКР), для выполнения которых в рамках реализации проекта разработано техническое задание по теме «Высокоэффективные лопатки газовых турбин с применением новых систем интенсификации теплообмена». ОКР возможно проводить как совместно с индустриальным партнером ОАО «НПО ЦКТИ», так и с другими заинтересованными предприятиями, такими как: ОАО «Металлист-Самара», ПАО «Газпром», ОАО «Калужский турбинный завод», АО «Уральский турбинный завод», ПАО «Силовые машины» и другие. Целью проведения ОКР является проверка на высокотемпературных газовых стендах технических и конструктивных решений, предложенных в рамках выполнения проекта, а также разработка рабочей документации на сопловую и рабочую лопатки первой ступени газовой.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.