

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 2016г. 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 № 1 в период с 28 сентября 2016 г. по 30 декабря 2016 г. выполнены следующие работы:

1. Выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, относящийся к проблеме интенсификации теплообмена и верификации теплогидравлических моделей.
2. Проведены патентные исследования по ГОСТ 15.011-96.
3. Проведен анализ существующих систем охлаждения лопаток газовых турбин.
4. Выполнено численное моделирование существующих систем охлаждения.
5. Разработаны направления совершенствования конвективных систем охлаждения радиальных каналов лопаток газовых турбин.
6. Разработаны направления совершенствования струйных систем охлаждения лопаток газовых турбин.
7. Проведен анализ существующих методов верификации гидравлических и тепловых моделей.
8. Проведен выбор и обоснование экспериментальных методов определения коэффициентов теплоотдачи.

Основные достигнутые результаты сводятся к следующему:

- 1) Обширный обзор имеющихся литературных данных по методам интенсификации конвективных и струйных систем охлаждения позволил выделить наиболее эффективные и практически применимые существующие типы интенсификаторов. Данные способы интенсификации были приняты базовыми для разработки новых, более эффективных методов.
- 2) Были проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96. Все изобретения и полезные модели относятся к конструкциям конвективных систем охлаждения, включающих оребренные радиальные каналы, передовые циклонные системы охлаждения, вихревые матрицы, штырьки и прочие интенсификаторы

теплообмена. Основные тенденции, связанные с увеличением площади поверхности теплообмена и дополнительной турбулизацией потока.

- 3) Проведен аналитический обзор существующих систем охлаждения. Наиболее применимыми в настоящий момент являются конвективные (включая струйные) и конвективно-плёночные системы охлаждения. С точки зрения эффективного использования охлаждающего воздуха и минимизации аэродинамических потерь в каналах рабочих и сопловых лопаток, связанных с выдувом в проточную часть хладагента, наибольший интерес представляют конвективные системы охлаждения. В связи с этим, они будут являться центральным объектом дальнейшего исследования.
- 4) Проведено численное исследование существующих (базовых) систем охлаждения лопаток газовых турбин. Рассмотрены:
 - каналы входной кромки: гладкий канал, оребренные каналы с различным видом оребрения;
 - каналы середины пера: гладкий канал, оребренный канал (ребра под углом 45° к направлению потока);
 - системы охлаждения выходной кромки: стержневая система, матрица компланарных каналов;
 - струйные системы охлаждения: входной кромки, плоской поверхности.

Для каждого расчетного варианта определено распределение числа Нуссельта по длине охлаждаемой поверхности, получены значения локальной и средней интенсификации теплообмена (для моделей с установленными интенсификаторами), вычислены характеристики гидравлического сопротивления, а также рассчитан коэффициент эффективности, позволяющий комплексно оценить работу элементов системы охлаждения.

- 5) Проведена разработка направлений совершенствования конвективных систем охлаждения радиальных каналов лопаток газовых турбин. Наиболее перспективным методом увеличения теплоотдачи в области входной кромки является модернизация существующей схемы, основанной на концепции закрученного потока, путем добавления различных интенсификаторов теплоотдачи, вихревых генераторов в подводящем тангенциальном канале (рисунок 1), а также изменения геометрии охлаждающих и подводящих каналов. В области середины пера лопаток газовых турбин, использующих петлевую схему охлаждения, возможна организация вдува потока в “теневую” часть ребра (рисунок 2), а также оптимизация расположения шахматного пучка штырьков с учетом линий тока хладагента. В области выходной кромки перспективным решением может оказаться комбинация традиционных типов

интенсификаторов типа штырьков, ребер и лунок. Исследование возможных схем их размещения на поверхности охлаждающего канала позволит выявить оптимальные комбинации.

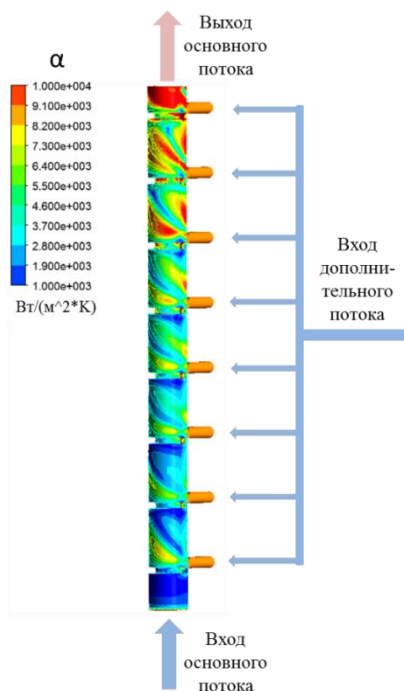
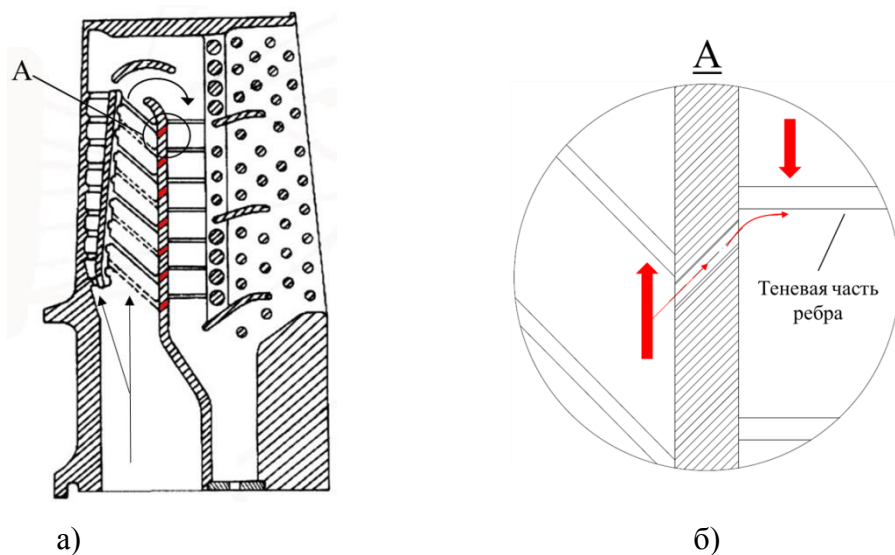


Рисунок 1 – распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала с применением циклонной системы подачи воздуха с установкой ребер;



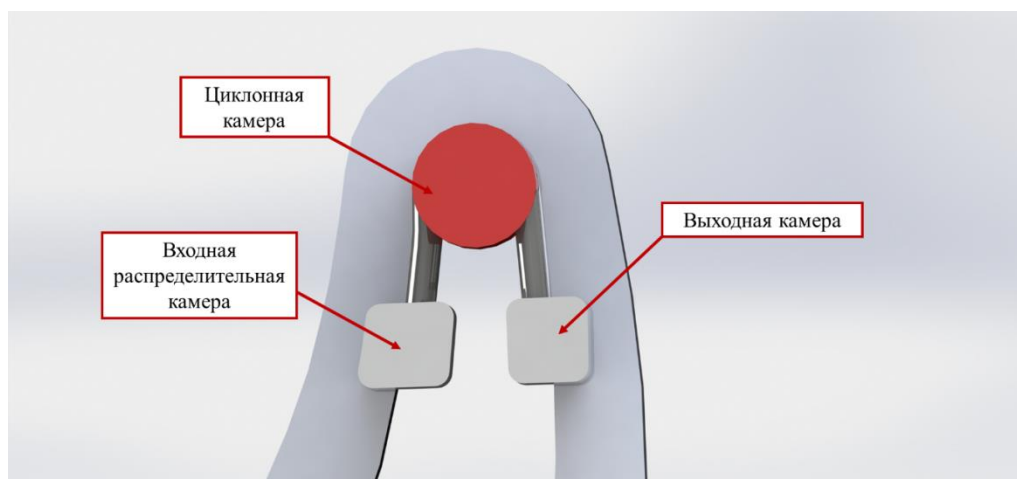
а) схема охлаждения, модифицированная за счет установки дополнительных отверстий;

б) вдув в теневую часть ребра

Рисунок 2 – Конвективная система охлаждения лопатки, содержащая радиальный канал с ребрами, расположенными перпендикулярно направлению движения потока

- 6) Проведена разработка направлений совершенствования струйных систем охлаждения лопаток газовых турбин. Дальнейшее совершенствование систем струйного охлаждения согласно проведенному аналитическому обзору и результатам численного исследования должно быть направлено на разработку мер, позволяющих уменьшить либо полностью нивелировать негативное влияние формирующегося сносящего потока охлаждающего воздуха. Установлено, что при величине сносящего потока равной или превышающей величину потока воздуха, поступающего через отверстия дефлектора, наблюдается резкое снижение эффективности работы системы охлаждения, падает среднее значение числа Нуссельта, ухудшается термическое состояние охлаждаемой поверхности лопатки. Изменение положения выхода охлаждающей среды в струйной системе, расположенной в области водной кромки, с верхнего на боковое не приносит заметных положительных результатов. Несмотря на то, что формирования сносящего потока не происходит, интенсивность теплообмена не увеличивается. Соответственно, необходимо исследовать другие возможные пути воздействия на характер течения в струйных системах охлаждения, например, установку системы ребер и лунок на охлаждаемой поверхности. Концепция комбинирования различных способов интенсификации теплообмена позволяет применить достоинства одних интенсификаторов для повышения эффективности работы других интенсификаторов, либо соединить положительные качества двух систем с целью достижения максимального эффекта. В данном случае, возможно использовать принцип оребрения поверхности, охлаждаемой системой воздушных струй. Введение ребер предположительно должно, с одной стороны, препятствовать формированию мощного сносящего потока и, с другой, способствовать увеличению площади поверхности теплообмена, а также степени турбулизации течения охлаждающей среды. Таким образом, вопрос исследования установки ребер, а также ребер и лунок является актуальным и требует более тщательной проработки. Другим направлением совершенствования струйных систем может стать дальнейшее развитие концепции применения закрученного потока для охлаждения поверхностей лопатки. Как показывают результаты проведенного численного исследования, циклонные системы (рисунок 3) обладают способностью к существенной интенсификации теплообмена и демонстрируют самые высокие значения коэффициента эффективности. Все это позволяет утверждать, что вихревые системы имеют значительный потенциал для использования в системах охлаждения. Исследование циклонов необходимо проводить в двух основных направлениях. Первое – совершенствование геометрии вихревых систем, а именно: поиск оптимальных

параметров входных и выходных сечений, их формы, размера, положения и другое. Второе – проработка конструкции самой вихревой камеры, куда входит исследование влияния формы вихревого канала, применение других интенсификаторов теплообмена, например, оребрение поверхности лопатки в области существования вихревого движения.



а)



б)



в)

а) изображение циклонной системы охлаждения, вписанной в профиль лопатки;

б) изображение циклонной системы охлаждения;

в) сечение каналов

Рисунок 3 – Циклонная система охлаждения входной кромки

- 7) Проведенный анализ методов определения тепловых характеристик лопаток показал, что для верификации тепловой модели лопатки с конвективной системой охлаждения целесообразно использовать метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Он позволяет разделить внешнюю и внутреннюю задачи теплообмена и получать экспериментальные тепловые характеристики лопатки в строго идентичных условиях испытания. Для лопаток с конвективно-пленочным охлаждением необходимо отдельно проверять адекватность конвективной составляющей тепловой модели с последующим комплексным контролем всех тепловых моделей в условиях газового потока. Проведение верификации гидравлической модели рационально выполнять с применением моделей, полученных путем трёхмерной печати.
- 8) Выполнен аналитический обзор существующих методов определения коэффициента теплоотдачи. По результатам проведенного анализа для выбранных объектов исследования и обоснованного направления исследования наиболее перспективным является, последний из указанных методов - метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Данный экспериментальный подход позволяет определять значение коэффициента теплоотдачи с точностью не менее 8...10 %.

Оценка элементов новизны результатов работ по первому этапу

В рамках первого этапа предложены новые пути развития систем интенсификации теплообмена. Проведено всестороннее сравнение существующих систем интенсификации с применением численного моделирования при интеграции рассматриваемых методов в профиль лопатки. Впервые проведена оценка влияния угла натекания в шахматный пучок стержневых турбулизаторов установленных в области выходной кромки.

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, и позволяют перейти к экспериментальным исследованиям, запланированным на II этап реализации проекта.

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