

Наименование работы:
**«Разработка высокоэффективной турбины для перспективного,
малоразмерного ГТД»**

Номинация:
**«За успехи в разработке авиационной техники и компонентов»
(ОКБ года)»**

Заваркин В.Н., Улитичев А.Г., Виноградов К.А., Бухалов И.Г.,
Карпов Ф.В., Крупин В.П.

В рамках научно-исследовательской работы (НИР) по созданию перспективного малоразмерного ГТД, обладающего меньшим на 10% удельным расходом топлива и повышенной по сравнению с существующими малоразмерными ГТД тягой были сформированы технические требования на разработку высокоэффективной турбины. Их основными особенностями относительно прототипов стали: чрезвычайно высокий потребный КПД турбин (+1-1.5%), высокий уровень температуры газа перед турбиной (+150К), а также высокая температура охлаждающего воздуха (за счет общего повышения параметров цикла, в том числе $\pi_{к\Sigma}$). Подобный уровень параметров не предусматривал возможности применения серийных отечественных жаропрочных сплавов без применения новаторских решений при организации системы охлаждения турбины, и ее конструктивного исполнения. А достижение показателей ТЗ по КПД было невозможно без использования инновационных подходов к повышению газодинамической эффективности турбины.

По результатам работ авторского коллектива выполнен проект высокоэффективной турбины высокого давления (ТВД) с неохлаждаемой рабочей лопаткой и проект турбины низкого давления (ТНД) для перспективного малоразмерного ГТД.

В ходе проектирования были выполнены следующие основные работы:

1. Аэродинамический проект ТВД и ТНД, выбор геометрии проточной части, расчет характеристик ТВД и ТНД. Выполнена 3D многопараметрическая оптимизация меридиональных обводов проточной части ТВД и ТНД, а также профилей лопаток в ПК IOSO PM для получения требуемых характеристик по аэродинамической эффективности. Впервые разработаны и введены в конструкцию несимметричные торцевые стенки соплового аппарата первой ступени ТНД. Применена развитая реборда РЛ ТВД. В ходе поверочных 3D газодинамических расчетов достигнуты высокие показатели аэродинамической эффективности ТВД и ТНД соответствующие требованиям ТЗ.

Облик проточной части и основные решения для обеспечения аэродинамической эффективности представлены на рисунке 1.

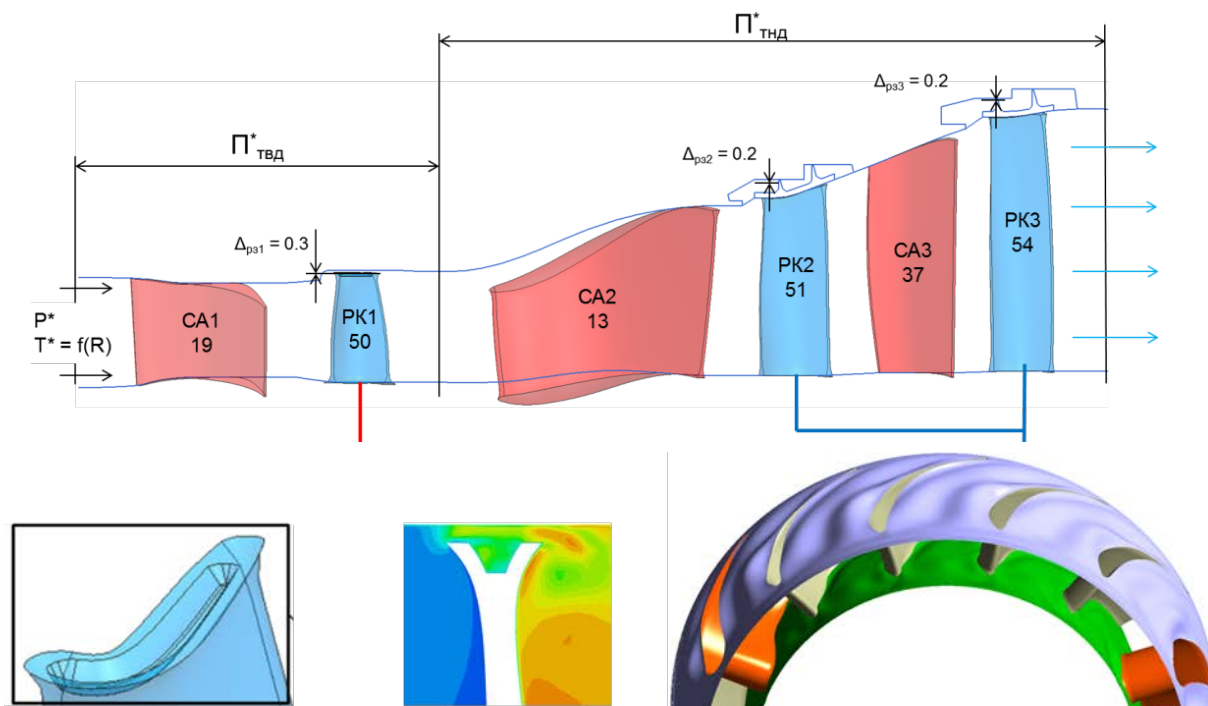


Рисунок 1 – Облик оптимизированной проточной части турбины малоразмерного ГТД и основные мероприятия по обеспечению КПД

2. Разработана конструкция ТВД, ТНД и промежуточной опоры. Подобраны отечественные жаропрочные материалы для деталей. По результатам 3D оптимизации профиля спроектирована неохлаждаемая рабочая лопатка (РЛ) ТВД малой высоты из монокристаллического сплава с ребордой сложной формы. Выполнены работы по оптимизации прочностных характеристик РЛ, компенсации газовых сил и т.д. Внешний вид РЛ представлен на рисунке 2.

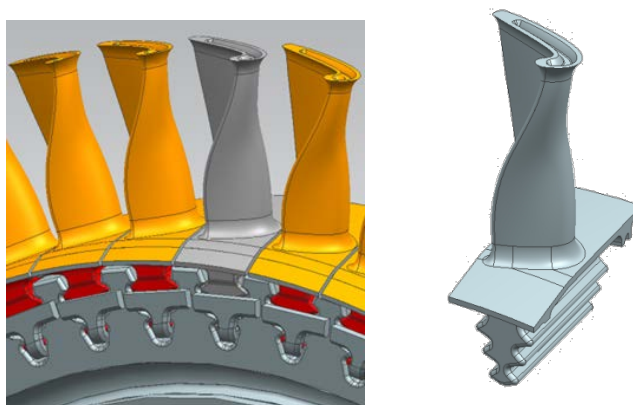


Рисунок 2 – Внешний вид РЛ ТВД.

Спроектированная геометрия РЛ позволила уменьшить концевые потери (-25...-30%), связанные с перетекание газа из зоны высокого давления на корыте через радиальный зазор и привела к повышению КПД ТВД на

~0,5%. Также обеспечено оптимальное обтекание профиля пера лопатки за счет газодинамической оптимизации в ПК IOSO NM и, как следствие, снижение потерь в ТНД от неравномерности газового потока на выходе из рабочего колеса ТВД.

Разработана конструкция соплового аппарата ТНД с интегрированной опорой. СА ТНД выполнен в виде моноколеса. Для снижения профильных потерь в широкохордных лопатках СА ТНД выполнена 3D газодинамическая оптимизация, связанная с модификацией меридиональных обводов проточной части и профилей лопаток, а так же разработка несимметричных торцевых стенок, что позволило достичь прироста КПД ТНД на 1,7% за счет минимизации интенсивности вторичных течений. Внешний вид СА ТНД представлен на рисунке 3.

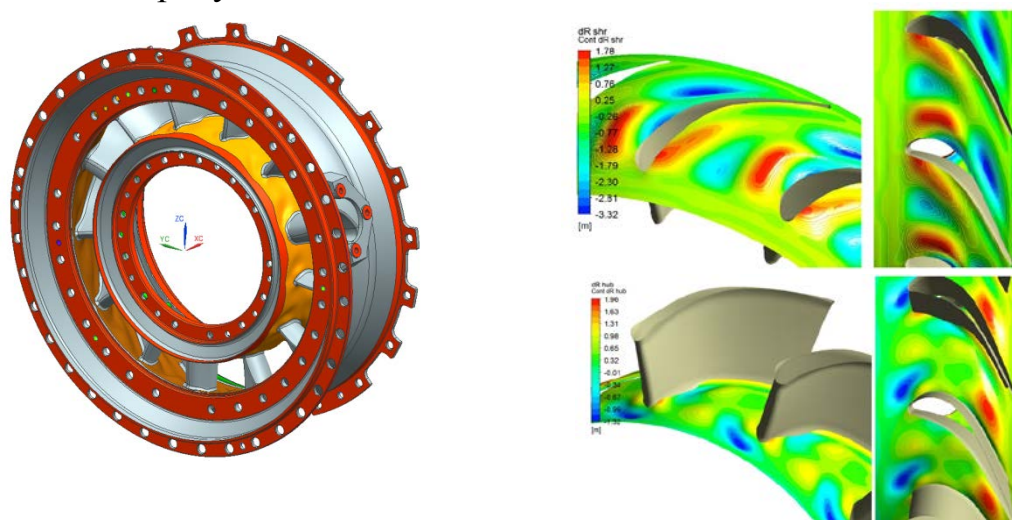


Рисунок 3 – Внешний вид СА ТНД и рельеф несимметричных обводов проточной части.

Конструкция маслокартера опоры турбины впервые разработана для изготовления методом аддитивных технологий с оригинальной схемой системы отвода масла, обеспечивающей работу масляной системы при любых углах наклона двигателя. Внешний вид маслокартера представлен на рисунке 4.

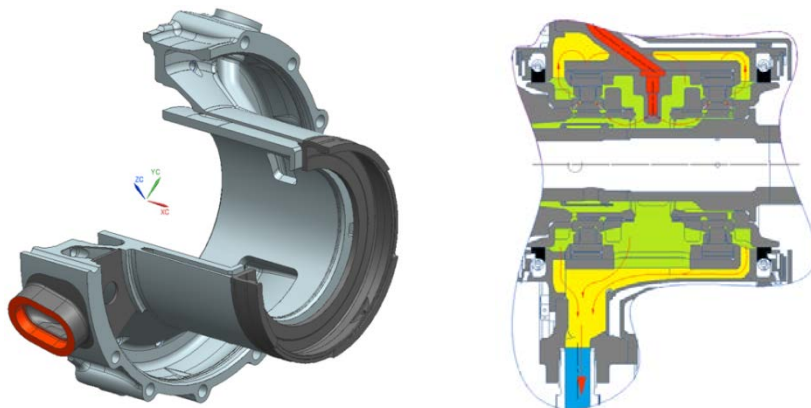


Рисунок 4 – Внешний вид маслокартера интегрированной опоры.

Адаптация конструкции маслокартера под изготовление методом 3D печати металлических материалов позволила значительно сократить номенклатуру применяемых деталей, создать сложную систему масляной полости, которую невозможно получить способом литья и значительно сократить время и ресурсы для подготовки литейной оснастки.

Рабочие колеса ТНД представляют из себя конструкцию типа «блиск», полученный методом высокоточного литья. В конструкцию внедрены мероприятия по снижению изгибных напряжений от газовых сил путем смещения центров масс сечений в окружном и осевом направлениях, повышению КПД рабочих колес, за счет применения «тонких» выходных и входных кромок и термокомпенсационные разрезы. Внешний вид профилей РК второй и третьей ступеней ТНД представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид блисков ТНД второй и третьей ступени.

3. Разработана общая компоновочная схема высокоэффективной турбины для перспективного малоразмерного ГТД. На базе разработанной компоновки выполнено проектирование и 2D/3D расчеты системы охлаждения и вентиляции в полостях турбины, системы охлаждения замкового соединения рабочей лопатки и диска ТВД, системы охлаждения СА ТВД, обеспечение наддува лабиринтных уплотнений и графитовых уплотнений интегрированной опоры. Определены требуемые минимальные расходы и давления воздуха, радиальные и осевые зазоры в полостях и по втулочному газодинамическому тракту для обеспечения приемлемого теплового состояния деталей и узлов турбины. Минимизация расходов воздуха и применение эффективной системы интенсификации охлаждения позволили в значительной степени повысить расчетные удельные параметры ГТД в целом. Компоновочная схема турбины представлена на рисунке 6.

Выполнено проектирование и оптимизация системы подвода охлаждающего воздуха к РК ТВД. В рамках оптимизации проработано более 8 вариантов конструкции системы охлаждения РК ТВД. Оптимизированная конструкция системы охлаждения РК ТВД позволила снизить максимальную температуру обода диска на ≈ 70 °С, что позволило обеспечить требуемые прочностные характеристики. В процессе проектирования разработана оригинальная система продувки замкового соединения рабочей лопатки и диска ТВД, заключающаяся в применении специального дроссельного экрана, системы отсечки газа в осевом зазоре и элемента герметизации окружного зазора в стыке трактообразующих полок рабочих лопаток ТВД.

Внешний вид конструкции и структура течения в системе охлаждения замка РЛ ТВД и диска ТВД представлены на рисунке 7.

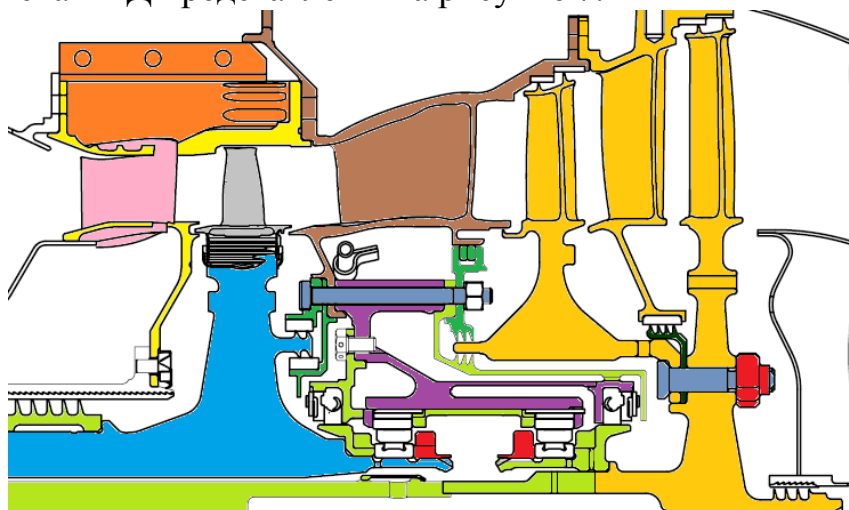


Рисунок 6 - Продольный разрез турбины малоразмерного ГТД.

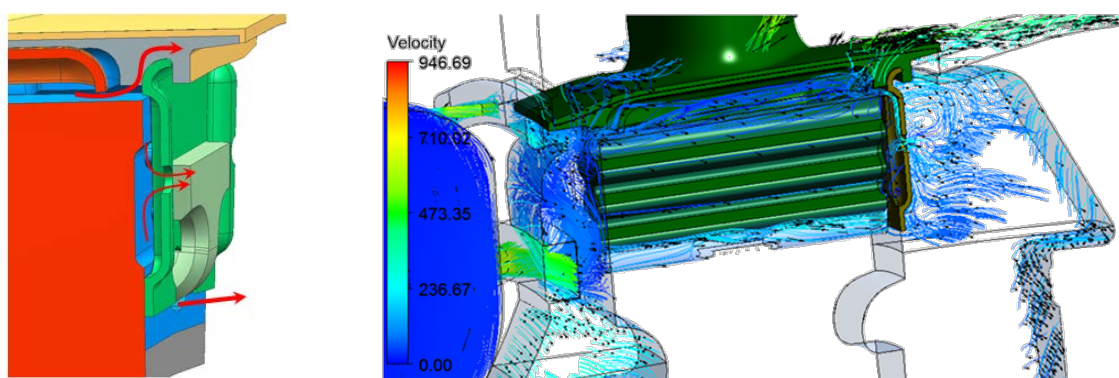


Рисунок 7 Система продувки замкового соединения РЛ и диска ТВД.

Разработанная схема позволила обеспечить надежное охлаждение элемента замкового соединения и, как следствие, ресурсные параметры РЛ и диска ТВД, которые изготавливаются из отечественных жаропрочных сплавов.

Также была решена одна из сложнейших задач по обеспечению организации эффективного охлаждения СА ТВД в совокупности с обеспечением минимального и стабильного радиального зазора над рабочей лопаткой ТВД, необходимого для обеспечения КПД. Для этого была разработана принципиально новая схема организации направленного потока охлаждающего воздуха и конструкция наружного корпуса СА ТВД. За счет применения направляющего экрана с системой пазов подвода воздуха и оребрения наружной стенки внешнего корпуса СА ТВД удалось значительно повысить коэффициенты теплоотдачи от охлаждающего воздуха к горячей стенке наружного корпуса, что в конечном итоге обеспечило отсутствие деформаций корпуса СА ТВД и минимизации радиального зазора над РЛ ТВД. Впервые для такого типа турбин успешно применена конструкция СА

ТВД из материала типа ВКНА. Конструкция СА ТВД представлена на рисунке 8.

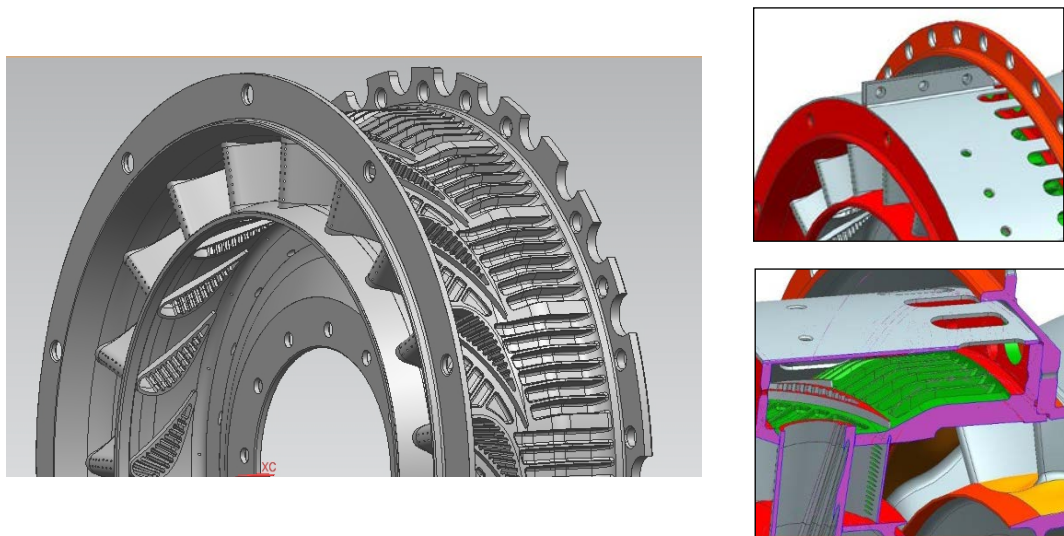


Рисунок 8 – Внешний вид СА ТВД

4. На основании разработанной конструкции был выполнен сквозной 3D тепло-гидравлический сопряженный расчет ТВД, позволивший детально определить тепловое состояние на основных режимах работы ГТД. 3D тепло-гидравлическая сопряженная модель представлена на рисунке 9.

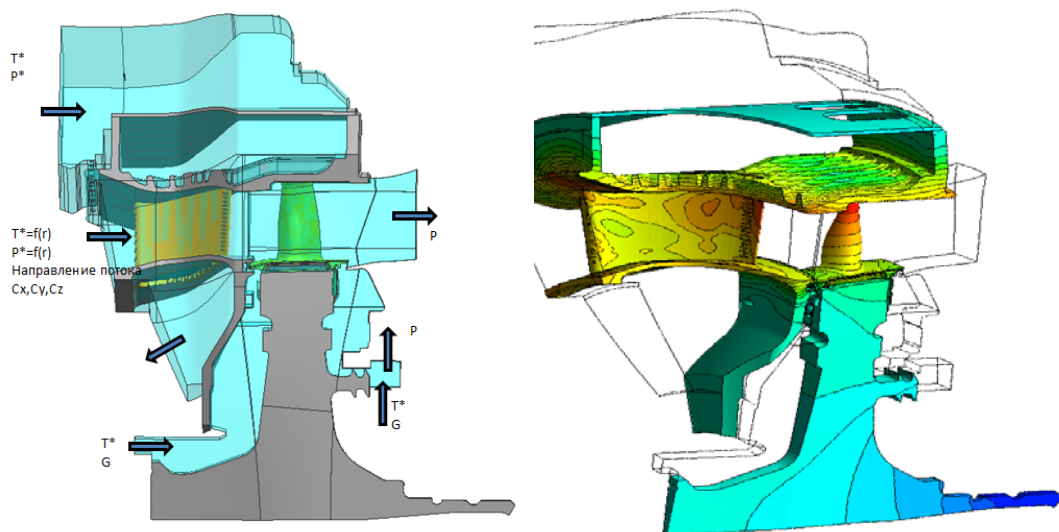


Рисунок 9 Сквозная 3D тепло-гидравлическая сопряженная модель ТВД и тепловое состояние по результатам расчетов.

На основе полученного теплового состояния выполнен полный комплекс расчетов на прочность деталей и сборочных единиц в 1D, 2D и 3D постановке в соответствии с Нормами прочности ГТД. Результаты расчетов показали соответствие ресурсных показателей и необходимых запасов прочности нормативной документации и были утверждены отраслевым институтом.

5. В соответствии с требованиями ТЗ на НИР на предложенную конструкцию выпущен комплект конструкторской документации, включающий в себя также документацию на научно-исследовательские работы по проведению препарирования экспериментальных узлов. Проведена технологическая подготовка производства, выполнены опытные работы по специальным процессам, произведена отработка технологии отливок и механической обработки деталей малой размерности.

6. Изготовлены опытные образцы турбины и проведены испытания в составе полноразмерного изделия с постановкой специальных средств измерения для подтверждения газодинамической эффективности, и теплового состояния основных элементов турбин. Результаты измерения параметров проточной части двумя различными способами (прямой замер параметров и «увязка» с основными параметрами ГТД) показали, что экспериментально полученные значения газодинамической эффективности параметров ТВД и ТНД полностью соответствуют требованиям технического задания на НИР.

Аналогичным образом было проведено экспериментальное исследование системы охлаждения турбины. Результаты изменений температур и давлений воздуха в полостях системы охлаждения, а также температуры металла показали соответствие результатам расчетов и обеспечение требуемого теплового состояния и прочностных характеристик ДСЕ.

Таким образом, выполнен полный комплекс работ по разработке, проектированию, расчетам и изготовлению высокоэффективной турбины для перспективного малоразмерного ГТД с обеспечением всех необходимых показателей, представленных в ТЗ, а также экспериментальное подтверждение заявленных характеристик в составе полноразмерного двигателя.