

Д.Г. Иевлев<sup>1,2</sup>, Ю.Н. Шмотин<sup>1</sup>, Д.В. Карелин<sup>1</sup>

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия (1)

РГАТА, Рыбинск, Россия (2)

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ ПОДВОДА ТУРБИНЫ ГТД

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты сравнения экспериментальных данных, полученных при измерении статических параметров потока охлаждающего воздуха в системе подвода ТВД ГТД с результатами расчётов по 1D и 3D методикам. 1D метод основан на теории графов с замыканием соотношениями для гидравлического сопротивления, а 3D методика базируется на решении осреднённых уравнений Навье–Стокса.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача организации течения в системе подвода охлаждающего воздуха к внутренним каналам лопатки ТВД является одной из наиболее актуальных и сложных задач проектирования современных ГТД.

Система подвода хладагента должна обеспечивать минимальный уровень потерь в междисковой полости, оптимальную закрутку потока для безударного входа в каналы лопатки и т.д.

Течение хладагента в системе подвода закручено, турбулентно и движется в условиях статор-ротор взаимодействия, поэтому оценка газодинамических характеристик является сложной задачей.

Оценка параметров потока в системе подвода, до недавнего времени производилось 1D методиками основанных на полуэмпирических закономерностях, полученных для характерных элементов геометрии.

Внедрение в процесс проектирования двигателя трехмерных методов вычислительной газовой динамики позволяет произвести детальное изучение гидравлических и тепловых характеристик систем охлаждения.

Инженер настраивает свои гидравлические модели на результатах термометрирования натурного двигателя. Хотя испытания в условиях полноразмерного двигателя крайне дорогостоящи, трудоёмки и длительны, при этом количество замеров очень ограничено. Поэтому процесс проектирования и доводки системы охлаждения смещается далеко по срокам, что негативно сказывается на конкурентоспособности ГТД на ранних стадиях эксплуатации.

Внедрение 3D расчётных методов позволит изучить картину течения, параметров среды и минимизировать экспериментальную доводку ГТД.

Целью работы являлось оценка адекватности предсказания 3D методиками параметров среды в системе подвода охлаждающего воздуха к первой рабочей лопатки ТВД на базе экспериментальных данных.

### 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является конструкция системы подвода охлаждающего воздуха ТВД ГТД производства ОАО «НПО «САТУРН».

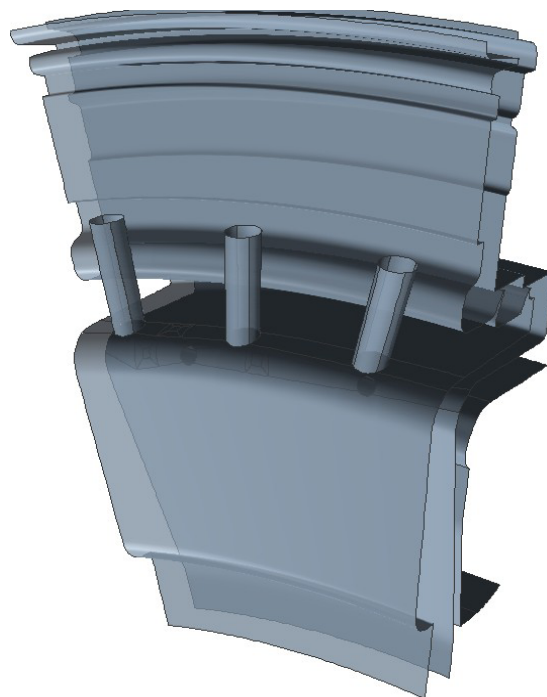


Рис. 1. Геометрия системы подвода

Система подвода состоит из парциального аппарата предварительной закрутки потока, междисковой полости, системы уплотнений и каналов подвода хладагента к лопатке через отверстия в диске ротора. Внутренняя полость рабочей лопатки была заменена отверстием с эквивалентной пропускной способностью. Геометрия представлена на рис. 1.

Воздух для системы охлаждения отбирается из-за ступени КВД. Через отверстия в диске ротора (выход 2) хладагент доставляется во внутренние полости рабочих лопатки. Через осевой зазор (выход 1) поток охлаждающего воздуха отводится в проточную часть. Схема расчётной области с расположением граничных условий представлена на рис. 2.

Распределение температуры стенок получено из расчёта на базе модуля тепловых задач программного комплекса ANSYS. Полученное распределение приложено как граничное условие для решения газодинамической задачи в обеих методиках.

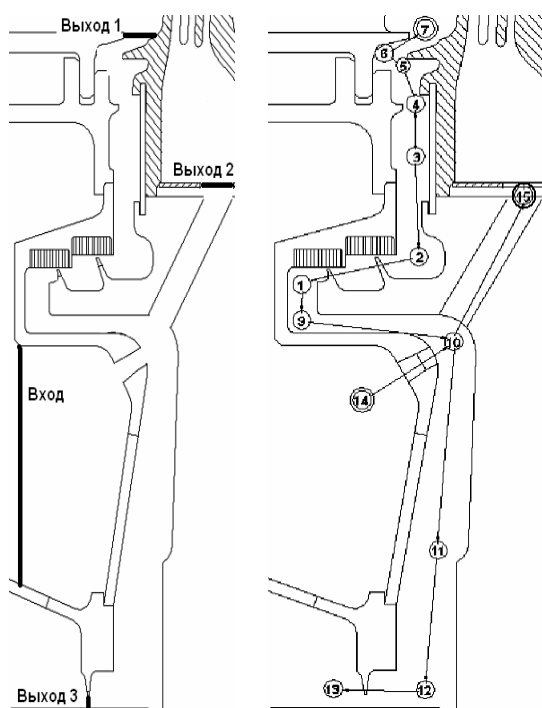


Рис. 2. Схема расчётной области

Рис. 3. Гидравлическая цепь графов

### 3. МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА

#### 3.1. Одномерная методика

Одномерная методика основана на теории графов. Система охлаждения в данной методике представляется как разветвленная сеть каналов – дерево графов.

Для оценки распределения расходов воздуха между каналами системы охлаждения использованы соотношения, вытекающие из первого и второго законов Кирхгофа. Для каждого графа выполняются соотношения принятые для указанного типа течения по своим полуэмпирическим законам гидравлического сопротивления.

Процесс поиска гидравлических характеристик основан на итерационном процессе корректировки расхода воздуха и физических параметров среды с учётом подогрева (охлаждения) воздуха в каналах охлаждения.

Гидравлическая цепь графов для объекта исследования представлена на рис.3.

#### 3.2. Трёхмерный расчёт

Другой метод для решения задачи оценки параметров потока в системе подвода, основан на решении системы осредненных уравнений Навье-Стокса.

В качестве инструмента исследования использован комплекс вычислительной газовой динамики ANSYS CFX-10.0. Данный программный продукт основан на методе конечных объемов с неявным алгоритмом интегрирования. Для замыкания системы уравнений применялась модель SST турбулентности Menter F.R [2].

Для дискретизации расчётной области регулярной гексагональной сеткой потребовалось 1 миллион узлов. Высота первой ячейки в окрестной области составляет 5-6 м, что позволяет корректно описывать физические процессы в пограничном слое.

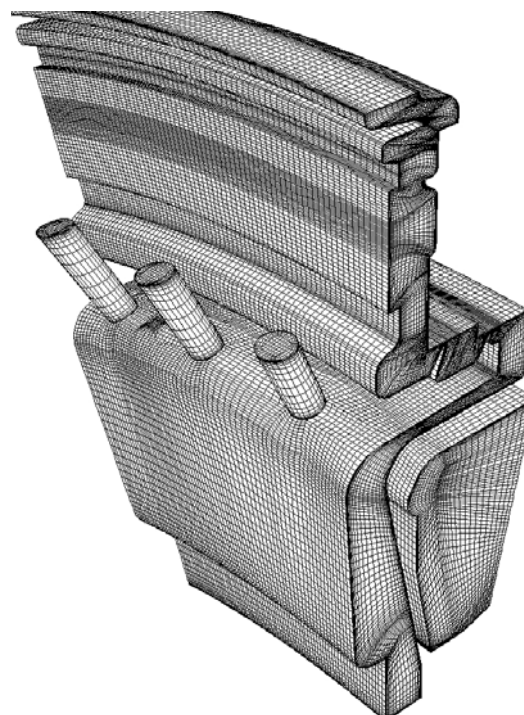


Рис. 4. Расчётная сетка

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Одной из основных характеристик течения в системе подвода является распределение расходов. Данная величина интегрально определяет структуру течения и играет доминирующую роль при вычислении всех параметров в одномерной методике. В табл. 1 представлено сравнение величин расходов, полученных по одномерной и трёхмерной методике.

Таблица 1. Сравнение по расходам полученным по одномерной и трёхмерной методике

	Разница, [%]
Вход в аппарат закрутки (Вход)	0.031
Выход в межлопаточный канал (Выход 1)	0.006
Выход во внутреннюю полость лопатки (Выход 2)	0.000
Выход в разгрузочную полость (Выход 3)	0.035

Как видно из табл. 1 разница между расчётными методиками не значительна.

На рис. 5, 6 представлены результаты сравнения статических параметров между расчётными и экспериментальными данными. Значения безразмерны. На графиках в качестве аргумента принималась безразмерная длина основного тракта (ветка 12 – 7 на рис.3).

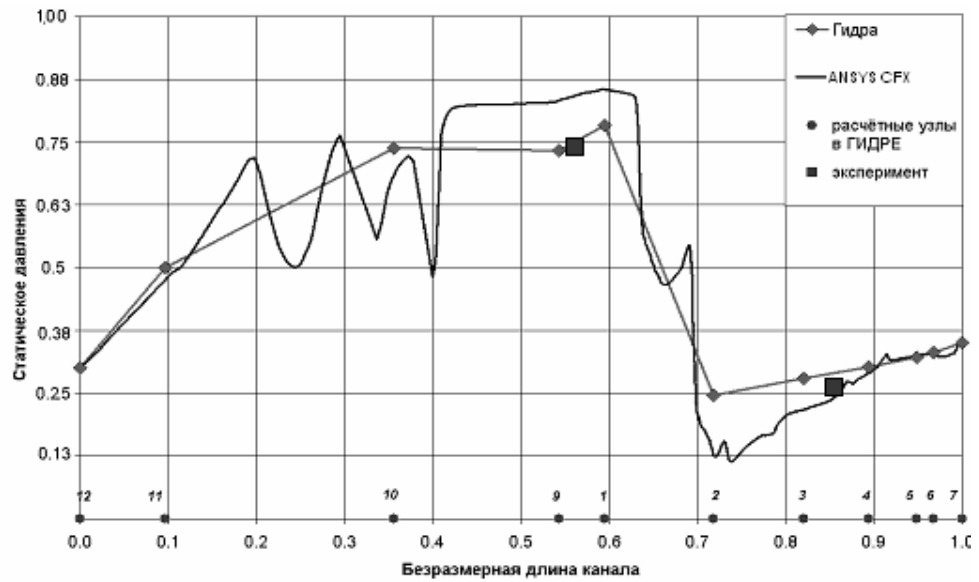


Рис. 5. Распределение статического давления

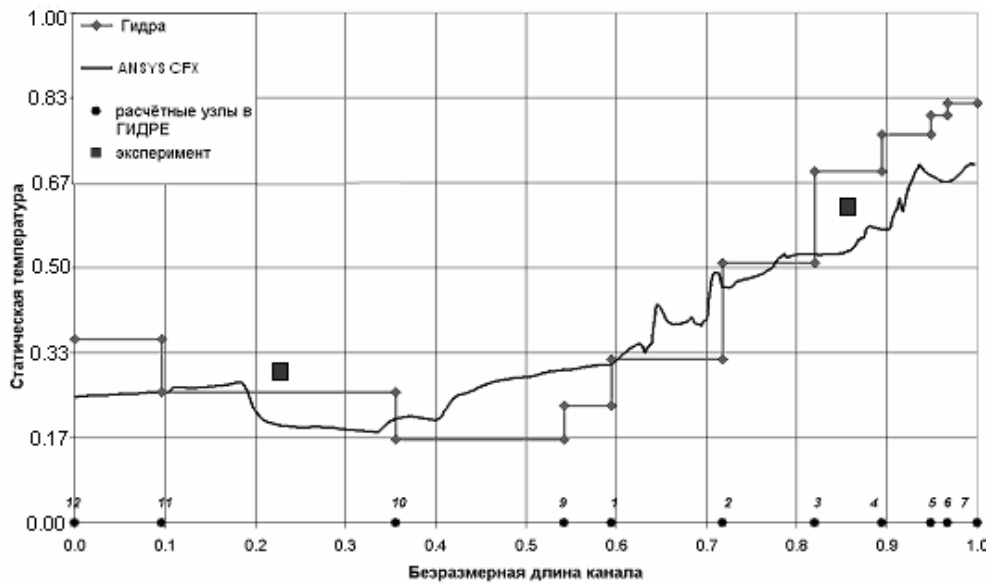


Рис. 6. Распределение статической температуры

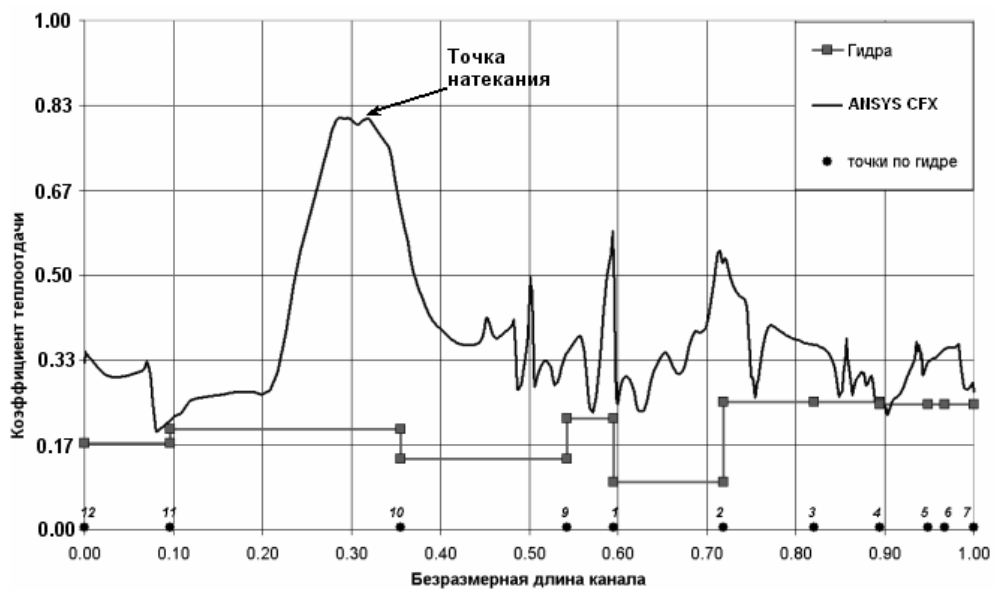


Рис. 7. Распределение коэффициента теплоотдачи

Разница по статической температуре составила менее 4 %, по статическому давлению менее 1 % в экспериментальных точках. Данная разница лежит в зоне погрешности экспериментальных данных.

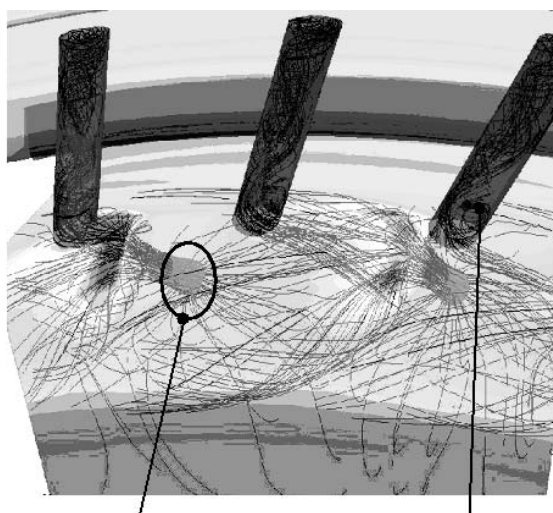
Заметное локальное отличие результатов 3D моделирования от 1D методики связано со сложной геометрией канала (система сотовых уплотнений, аппарат закрутки и т.д.) и вихревой структурой течения.

На рис. 7 представлен график коэффициента теплоотдачи на поверхности рабочего диска. Коэффициент теплоотдачи для 3D методики вычислялся по формуле:

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_f^*} \quad (1)$$

При одномерном вычислении значение коэффициента теплоотдачи находилось пересчётом из числа Nu.

Локальные флуктуации коэффициента теплоотдачи, полученные для результатов 3D расчёта, объясняются непостоянной структурой пограничного слоя. Пик коэффициента теплоотдачи приходится на точку натекания, картина течения в области которого представлена на рис. 8.



Аппарат закрутки      Отверстия в диске ротора  
Рис. 8. Картина течения в области натекания

Следует добавить, что вычисление коэффициента теплоотдачи на основе одномерной методики не позволяет отследить трёхмерные эффекты, связанные со сложностью геометрии канала и характером пространственного вихревого течения.

Важно отметить, что на данный момент трудоёмкость 3D численного моделирования позволяет применять данные методы только на стадии поверочных расчётов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены тестовые расчеты по различным методикам оценки параметров потока хладагента в системе подачи ТВД ГТД.

Сопоставление с экспериментальными данными показывает, удовлетворительное согласование для обеих расчётных методик.

3D расчётные методы должны интегрироваться в процесс проектирования систем охлаждения на стадии поверочных расчётов и идентификации проектных одномерных методик.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Nu – число Нуссельта;  
Pr – число Прандтля;  
Re – число Рейнольдса;  
 $T^*$  – полное давление, Па;  
T – статическая температура, К;  
P – статическое давление, Па;  
Tu – интенсивность турбулентности;  
q – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> К);  
 $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К).  
Индексы:  
w – стенка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Локай В.И., Бодунов М.Н., Жуйков В.В., Щукин В.А. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985. 216 с.
2. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal., 1994. Vol. 32. № 8. P. 1598-1605.