

3. Технический отчет 2560930. Улучшение аэродинамических характеристик сопловой и рабочей решетки профилей последней ступени турбины винтовентилятора. Экспериментальное исследование двух вариантов сопловой решетки. Москва. МЭИ 1993. - 21с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М., «Энергоатомиздат», 1984.
5. Давыдов А.А. Исаков С.Н. Расчет течения газа в плоских охлаждаемых решетках турбинных лопаток. // В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей/КуАИ, 1983, с. 83-89.

## **РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СОПЛОВОМ АППАРАТЕ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ТВД**

Батурин О.В., Матвеев В.Н.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Развитие численных методов газовой динамики позволило рассматривать задачи течения потока газов в трехмерной постановке и соответственно учитывать многие явления трехмерного потока. Однако рекомендовать новые методы к применению при проектировании новых изделий можно только после успешного сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

Целью предлагаемой работы является сравнение результатов расчетов трехмерного потока с помощью программы численного моделирования FlowEx, основанной на методе конечных разностей [2], и программы расчета вязкого трехмерного турбулентного потока, основанной на решении уравнений Навье-Стокса методом конечных объемов [1], между собой и с данными продувок натурного соплового аппарата в составе газогенератора.

Объектом исследования является сопловой аппарат (СА) первой ступени турбины высокого давления двигателя НК-93. Сопловой аппарат в сборе с камерой сгорания (КС) испытывался на установке "ГАЗ". В процессе проведения продувок измерялись: полное давление и температура на входе в КС, полное давление на входе в СА, статическое давление на выходе из СА на втулке и периферии, а также расход газа. Полная температура воздуха на входе в СА принималась равной замеренной температуре газа на входе в КС. В результате проведения эксперимента была получена зависимость пропускной способности СА от перепада давлений на нем  $p_0^*/p_1$  ( $p_1$  – среднее давление за венцом). Относительная погрешность экспериментального определения пропускной способности составляла  $\pm 2,3\%$ . Результаты продувок были взяты из работы [3].

Для изучения пространственного течения газа в сопловом аппарате были созданы две трехмерные расчетные модели. Одна для расчетов в программе FlowEr, другая для расчетов в программе, основанной на методе конечных объемов. Обе расчетные модели содержат один межлопаточный канал.

В расчетах моделировались условия, которые имели место при продувках без горения в камере сгорания. В связи с этим принимались следующие граничные условия:

- на границах, смежных с соседними межлопаточными каналами, было установлено периодическое граничное условие;
- на выходе из межлопаточного канала задавалось линейное по высоте канала распределение статического давления ( $p_{1пер} = 106190 \text{ Па}$ ;  $p_{1сп} = 101325 \text{ Па}$ ;  $p_{1вт} = 96410 \text{ Па}$ );
- перед решеткой профилей задавались полные давления и температура. Входная температура принималась равной средней температуре на входе в СА при продувках без горения ( $T^* = 550 \text{ К}$ ). Полное давление выбиралось из условия достижения заданного перепада давления. Кроме того, на входе задавался уровень входной турбулентности; выдув охлаждающего воздуха не моделировался.

Геометрия соплового аппарата соответствовала геометрии при нормальных условиях ( $T = 288 \text{ К}$ ). В качестве рабочего тела использовался воздух, параметры которого определялись в соответствии с законом идеального газа. Вязкость рабочего тела находилась по формуле Сатерленда. Модель была разбита на гексаэдральные конечные элементы. Общее число конечных элементов трехмерной модели для расчета методом конечных объемов равнялось 382350. При расчете использовалась модель турбулентности RNG k-ε. Общее число конечных элементов трехмерной модели в программе FlowEr составляло 102400 (40x40x64). При расчете использовалась модель турбулентности SST Ментера.

В результате расчета определялся расход воздуха через решетку при заданном перепаде давлений на СА. Затем находилась пропускная способность турбины, связанная с расходом воздуха, следующим соотношением:

$$A = \frac{G \cdot k \cdot \sqrt{T_0^*}}{p_0^*},$$

где  $k = 1,004$  - коэффициент, учитывающий тепловое изменение площади горла соплового аппарата. Величина  $k$  была определена с помощью рассчитанных размеров проточной части при  $T_r^* = 288 \text{ К}$  и  $T_r^* = 1415 \text{ К}$  [4], при этом считалось, что площадь горла меняется в зависимости от температуры по линейному закону.

Расчет методом конечных объемов (в таблице строка МКО) проводился с помощью алгоритма установления по неявной схеме. Расчет велся

до уровня остаточных невязок  $10^{-4}$ . Результаты расчетов пропускной способности соплового аппарата приведены в табл. 1. Здесь же даны отклонения полученных в расчете данных от результатов эксперимента.

По результатам расчетов построена зависимость пропускной способности соплового аппарата  $A$  от перепада давления  $p_0^*/p_1$  (см. рис. 1).

Таблица 1

Результаты расчета пропускной способности соплового аппарата

$p_0^*/p_1$		1,5	1,77	2	2,3	2,6
$A, \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0,5}$	Эксперимент	0,000783	0,00828	0,000846	0,000862	0,000874
	МКО	0,000757	0,000817	0,000835	0,000835	0,000853
	FlowEr	0,000778	0,000824	0,000832	0,000843	0,000849
Отклонение результатов расчета от эксперимента, %	по FlowEr	3,33	1,38	1,23	0,77	1,19
	по МКО	0,577	0,5462	1,6	2,1	2,9
Погрешность экспериментального определения $A$ , %		2,3				

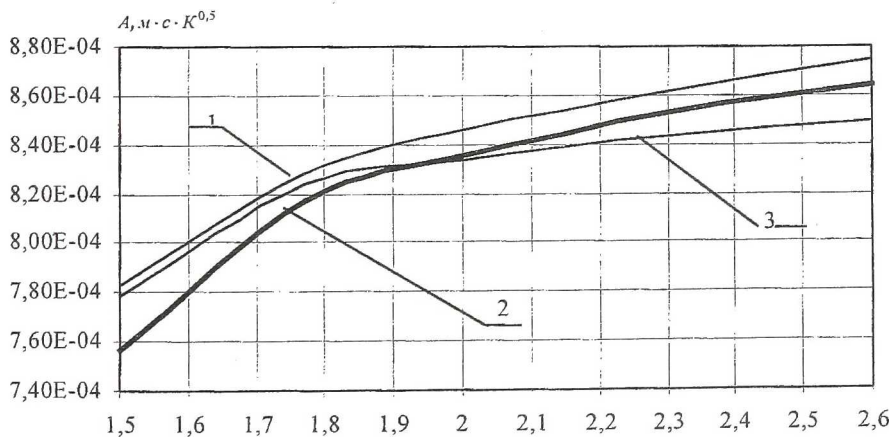


Рис. 1. Графические зависимости пропускной способности соплового аппарата, полученные в эксперименте и при расчете: 1 - экспериментальная кривая (погрешность эксперимента  $\pm 2,3\%$ ); 2 - результат расчета методом конечных объемов; 3 - результат расчета по программе FlowEr

Из представленных результатов расчета видно, что оба расчетных метода показывают заниженные значения пропускной способности по сравнению с экспериментом.

Метод конечных объемов дает хорошее совпадение с экспериментальными данными как качественно, так и количественно. Максимальная разница между экспериментом и данными, полученными в расчете, наблюдается при пониженных перепадах давления на сопловом аппарате и не превышает 3,33%. При  $p_0^*/p_1 > 1,6$  расчетная кривая лежит в поле рассеивания экспериментальных значений.

Расчетная программа FlowEr дает погрешность не более 2,9%. При  $p_0^*/p_1 < 2,4$  расчетная кривая лежит в поле рассеивания экспериментальных значений. Однако расчетные точки, полученные в программе FlowEr, имеют значительное рассеивание от аппроксимационной кривой (величина рассеивания составляет до 4%).

Занижение величины пропускной способности в расчетах можно объяснить двумя факторами. Во-первых, программы численного моделирования течения газов, как правило, завышают величину потерь энергии в венцах, что приводит к снижению вычисленного расхода газа. Во-вторых, вычисленная величина пропускной способности недостаточно точна из-за косвенного теплового изменения проточной части.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что обе рассматриваемые программы моделируют течения газа в сопловом аппарате осевой турбины с достаточной для определения пропускной способности точностью и могут быть рекомендованы для применения при проектировании новых изделий.

#### Список литературы

1. Ершов С.В., Русанов А.В. Комплекс программ *FlowER*® для расчета трехмерных вязких течений в многоступенчатых турбинах и компрессорах // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. междунар. науч.-техн. конф./НАН Украины и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997. – С. 158 – 164.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М., «Энергоатомиздат», 1984 – 150с.
3. Технический отчет 001.11699. Определение расходных характеристик первого соплового аппарата изделия КВ по испытаниям на стенде МФК. Самара: СНТК 1992г. – 35с.
4. Технический отчет 001.10476. Результаты расчетного проектирования турбины изделия КВ. Самара: СНТК 1990г. – 299с.