

УДК 621.45.02

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА РАСЧЁТНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА ТУРБИНЫ

© 2013 Д.А. Колмакова, О.В. Батулин, Г.М. Попов, Л.С. Шаблий

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 29.11.2013

Оценка влияния неопределённости геометрических и физических переменных на рабочий процесс в венце лопаточной машины была проведена на примере незакрученной решётки соплового аппарата. Моделирование течения в сопловом аппарате осуществлялось в специализированном программном комплексе NUMECA. Проведенные расчеты позволили дать качественную и количественную оценку исследуемой проблеме, а также разработать дальнейшие направления исследований.

Ключевые слова: турбина, профиль, пропускная способность, расчетная модель

На современном этапе проведения исследований почти ни одна отрасль промышленности не обходится без привлечения вычислительной техники и программного обеспечения. Турбомашиностроение не является исключением. В частности, задачи газовой динамики лопаточных машин (ЛМ) все чаще решаются с использованием специализированных CFD программных продуктов, возможности которых постоянно растут. Однако, несмотря на все достоинства таких программ, точность и адекватность получаемых результатов зависит от большого числа объективных и субъективных факторов (ошибки пользователя, программных кодов, алгоритмов, физических моделей и неопределённость исходных данных). Неопределённость исходных данных при моделировании течений в ЛМ может вносить до 80% [1] в общую итоговую погрешность результата. Сегодня существует понимание о том, что эту неопределённость необходимо учитывать для повышения достоверности расчёта. Однако алгоритмы и программная реализация такого учёта находятся еще на начальном этапе.

Цель работы: оценка влияния неопределённости исходных геометрических и физических параметров на газодинамические характеристики соплового аппарата (СА) осевой турбины.

На первом этапе был проведен анализ отраслевых стандартов и доступных рабочих чертежей ЛМ, составленных на разных предприятиях, который позволил выделить их важнейшие геометрические параметры и типовые значения допусков на эти размеры. Значения погрешностей для физических параметров потока были приняты согласно оценкам, приведенным в работе [2]. Оценка влияния неопределённости геометрических и физических переменных на рабочий процесс в венце ЛМ была проведена на примере прямой решётки СА, для которого имеются обширные экспериментальные данные. Исходными данными для построения базовой расчётной модели являлись координаты профиля и его геометрические параметры, полученные из атласа [3]. Схема решётки профилей приведена на рис. 1, исследуемые геометрические параметры с указанием допусков, принятых в соответствии с типовыми значениями, в табл. 1, погрешности параметров потока – в табл. 2.

Моделирование течения в СА осуществлялось в специализированном программном комплексе NUMECA по стандартному алгоритму: 1) выбор расчётной схемы, выбор граничных условий и основных допущений; 2) построение расчётной модели; 3) непосредственно расчёт; 4) визуализация результатов расчета и определение основных расчётных параметров; 5) анализ полученных результатов.

Основные параметры расчётных моделей приведены в табл. 3. В качестве контролируемых критериев эффективности СА были приняты 3 параметра: пропускная способность (A_{CA}),

Колмакова Дарья Алексеевна, аспирантка
Батулин Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: udet@mail.ru
Попов Григорий Михайлович, аспирант
Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: afroaero@hotmail.com

коэффициент потерь (ζ_{CA}) и угол выхода потока из СА (α_1). Значения перечисленных параметров рассчитывались на основании данных, полученных в ходе расчетов по следующим формулам:

$$A = \frac{G\sqrt{T_r^*}}{p_r^*},$$

где G – расход газа через сопловой аппарат, кг/с; T_r^* – полная температура газа на входе в сопловой аппарат, К; p_r^* – полное давление газа на входе в сопловой аппарат, Па.

Таблица 1. Геометрические параметры исследуемой решетки профилей

Размер	Значение размера	Величина допуска
хорда профиля, b , мм	72,4	$\pm 0,3$
угол установки профиля, γ , °	31,17	± 20
радиус выходной кромки, r_2 , мм	0,518	-0,1
высота лопатки, h , мм	60	$\pm 0,15$

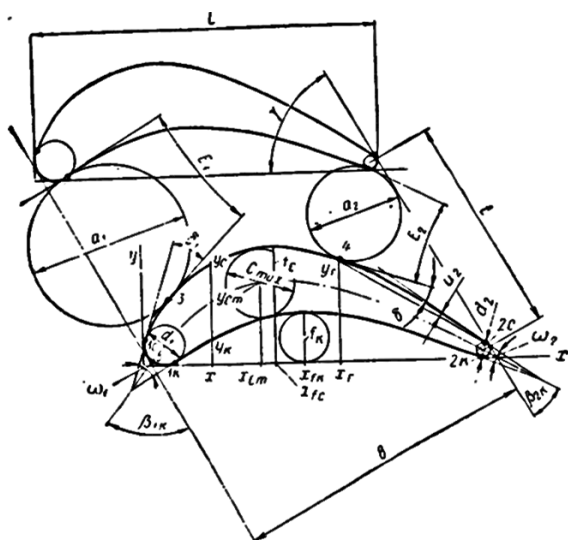


Рис. 1. Схема исследуемой решетки профилей [2]

$$\zeta = 1 - \eta_p = 1 - \varphi^2,$$

где η_p – коэффициент полезного действия решетки; $\varphi = c_1/c_{z.ad}$ – коэффициент скорости.

$$\alpha = \arctan \frac{V_z}{V_y},$$

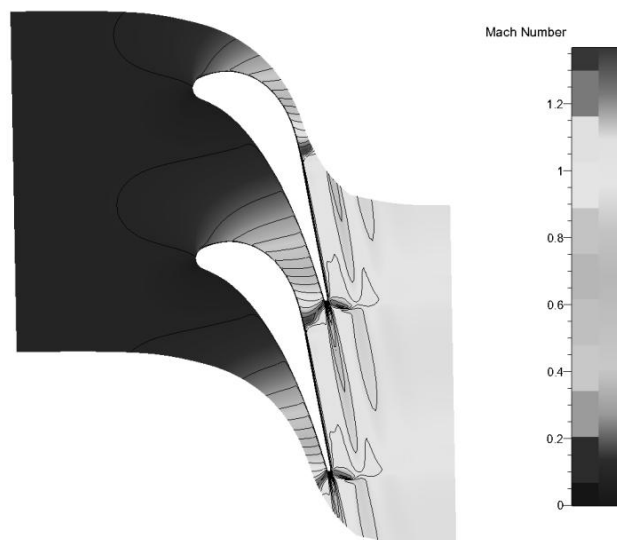
где V_y и V_z – Y и Z проекции скорости соответственно, м/с.

Результаты расчёта базового варианта соплового аппарата приведены на рис. 2 и 3. На рис. 3 также приведено сравнение расчётных (сплошная линия) и экспериментальных [2]

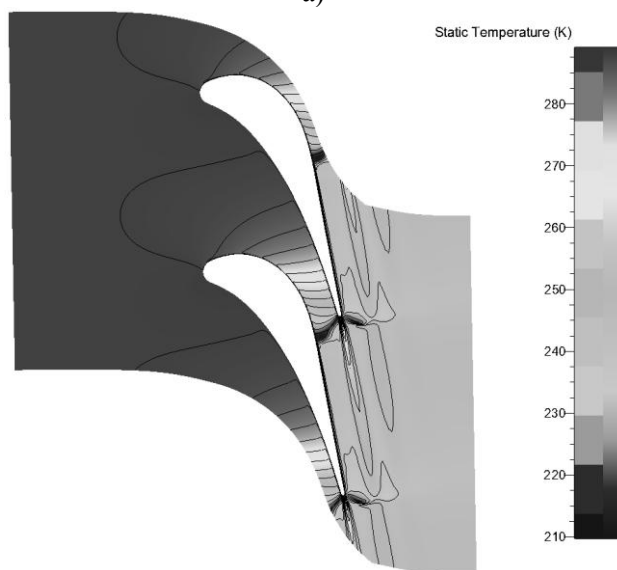
(пунктирная линия и точки) данных. Расчётные и экспериментальные зависимости имеют одинаковый характер, однако значительно отличаются по величине коэффициента потерь. Таким образом, созданная модель адекватно описывает процессы, происходящие в решетке, но недостаточно хорошо предсказывает численное значение потерь.

Таблица 3. Основные параметры расчётной модели

Общее число элементов в сетке	$\approx 1,5$ млн
Размер первого элемента сетки	0,001 мм
Граничные условия расчётной модели	На входе: $p^* = 101325$ Па $T^* = 288,15$ К На выходе: p , Па
Модель турбулентности	<i>Spalart-Allmaras</i>



а)



б)

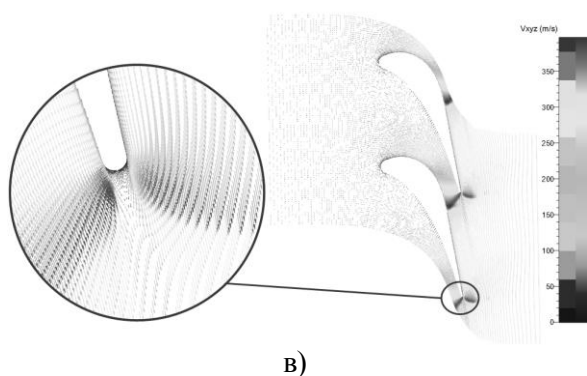


Рис. 2. Поля распределения чисел Маха (а) и статического давления (б), векторов скорости (в) в среднем сечении решётки СА

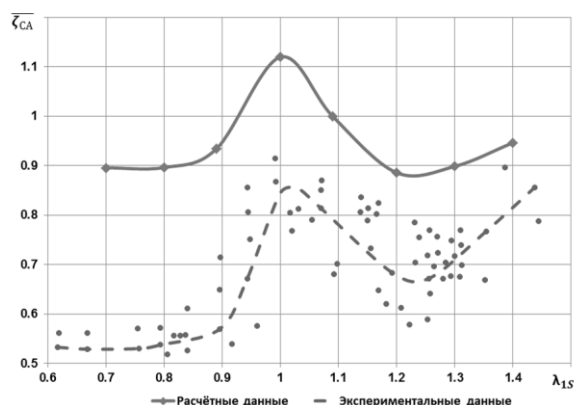
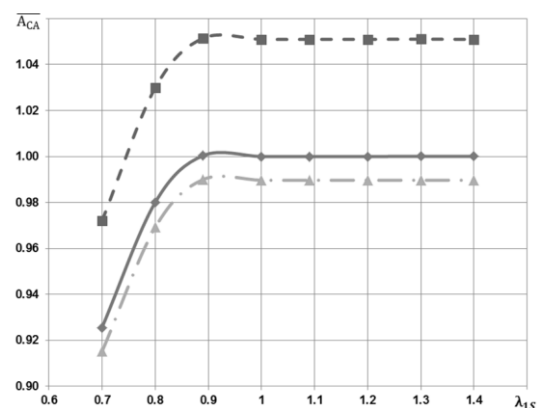


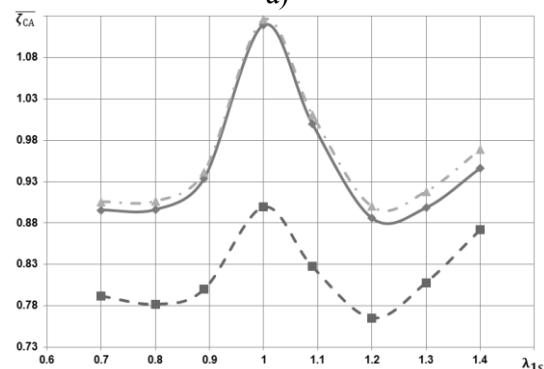
Рис. 3. Зависимость относительных профильных потерь от приведенной изоэнтропической скорости на выходе из решетки

В ходе работы было оценено влияние на расчётные характеристики СА каждого геометрического параметра в отдельности (хорды, угла установки, радиуса выходной кромки и высоты лопаточного венца), а также их суммарное влияние (рис. 4). На графиках приводятся результаты расчёта базовой модели, так называемой максимальной модели, которая учитывает изменение геометрических параметров, приводящее к повышению параметров СА, минимальной модели – учитывает изменение геометрических параметров, приводящее к понижению параметров СА.

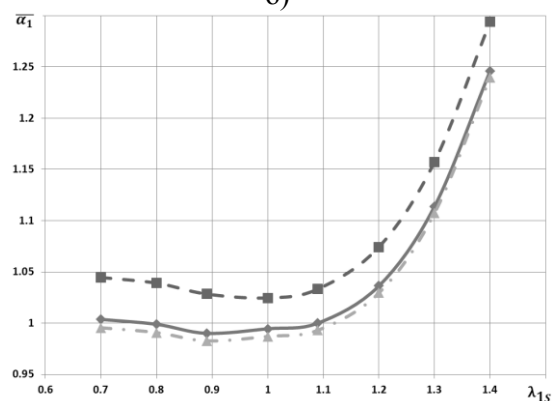
По аналогичному алгоритму было оценено влияние изменения параметров потока, используемых в качестве граничных условий на параметры СА: полное давление p^* и температура T^* на входе и статическое давление p на выходе. Изменение полной температуры не привело к изменению исследуемых параметров СА. Изменение давлений привело к незначительному изменению параметров в пределах 0,01-0,3%. На рис. 5 приведены зависимости при изменении статического давления.



а)

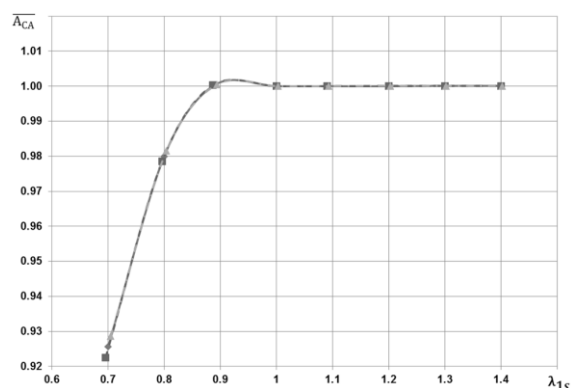


б)



в)

Рис. 4. Зависимость относительной пропускной способности (а), относительных профильных потерь (б) и относительного угла выхода потока (в) от приведённой изоэнтропической скорости на выходе из решетки (ромб – базовая модель, квадрат – максимальная модель, треугольник – минимальная модель)



а)

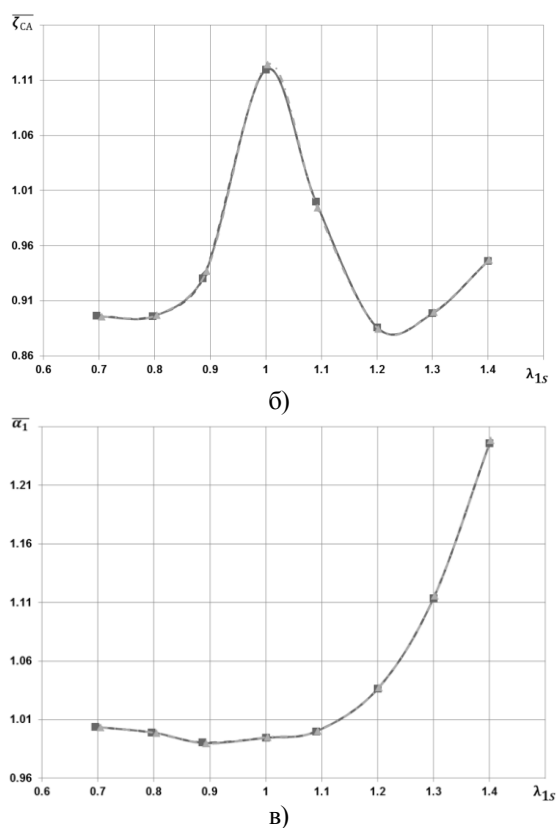


Рис. 5. Зависимость относительной пропускной способности (а), относительных профильных потерь (б) и относительного угла выхода потока (в) от приведённой изэнтропической скорости на выходе из решетки

Выводы:

1. Изменение физических параметров потока, которые используются в расчётных исследованиях в качестве граничных условий (p^* , T^* , p), в пределах заданной погрешности, не оказывает существенного влияния на протекание характеристик исследуемого лопаточного венца, а

вызывают лишь смещение точек на характеристиках.

2. Изменение величины каждого геометрического параметра, рассмотренного в данной работе, в пределах допуска в разной степени влияет на характер изменения графиков зависимостей, используемых в качестве оценочных критериев, а также их численных значений.

3. Наименьшее влияние (менее 0,5%) на изменение параметров рассматриваемого СА оказывает изменение хорды профиля b_{CA} в пределах заданного допуска. Наибольший вклад в изменение всех параметров (до 4%) вносит величина угла установки профиля γ_{CA} . Суммарное влияние изменения всех исследуемых геометрических параметров на расчётные характеристики в целом согласуется с характером и величиной влияния каждого параметра в отдельности и может достигать 5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Перепелица, В.А.* Дискретная оптимизация и моделирование в условиях неопределённости данных / *В.А. Перепелица, Ф.Б. Тебугева.* – М.: Акад. естествознания, 2007. 152 с.
2. *Батурин, О.В.* Совершенствование проточной части осевых авиационных турбин при их газодинамической доводке с помощью численных методов газовой динамики: Автореферат дис. на соис. учен. степ. канд. техн. наук. – Самара, 2005. 24 с.
3. *Венедиктов, В.Д.* Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин. – М.: ЦИАМ, 1990. 393 с.

THE ESTIMATION OF INITIAL DATA UNCERTAINTY INFLUENCE ON THE CALCULATED GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TURBINE BLADE ROW

© 2013 D.A. Kolmakova, O.V. Baturin, G.M. Popov, L.S. Shabliy
Samara State Aerospace University named after acad. S.P. Korolyov
(National Research University)

The estimation of geometrical and physical variables uncertainty influence on the workflow in turbomachine blade row was carried out by the example of untwisted nozzle blade (NB). The flow in the nozzle blade modeling was carried out in a specialized software package NUMECA. The carried calculations allowed to give a qualitative and quantitative assessment of research problem, and to develop further areas of research.

Key words: turbine, profile, throughput, computational model

Dariya Kolmakova, Post-graduate Student; Oleg Baturin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: udet@mail.ru; Grigoriy Popov, Post-graduate Student; Leonid Shabliy, Candidate of Technical Sciences, Assistant. E-mail: afroaero@hotmail.com