

УДК 621.165

В.П. СУББОТОВИЧ, канд. техн. наук, А.Ю. ЮДИН

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

РАСЧЕТ ДВУХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ СОПЛОВЫХ И РАБОЧИХ РЕШЕТОК ТУРБИН

За допомогою методу розв'язування прямої задачі, розробленого авторами статті, виконані розрахунки двовимірної течії в соплових і робочих решітках турбін. Аналіз розрахункових та експериментальних даних показав, що новий метод дозволяє із задовільною точністю розраховувати безвідривні течії в конфузорних, конфузорно-дифузорних та дифузорних каналах решіток за умов різних кутів атаки.

With the help of a method of the solution of the direct problem developed by authors of article the calculation of 2D flow in nozzle and rotor cascades of turbines are executed. The analysis of calculated and experimental data has shown, that the new method allows to determinate with satisfactory accuracy parameters of non-separated flow in confusor, confusor-diffuser and diffuser channel of turbine blade cascades with different incidence.

С помощью разработанного авторами статьи метода решения прямой задачи [1] выполнены расчеты двухмерного течения в межлопаточных каналах двух рабочих решеток ТР-1А (Р-2617А) [2, 3] и ТР-2А (Р-3021А) [2, 4] и одной сопловой решетки ТС-1А (С-9012А, Н-4) [2, 5]. Для этих решеток профилей имеются экспериментальные данные, полученные в МЭИ [2, 3, 6] и НТУ «ХПИ» [7, 8]. Проведено сравнение результатов расчета течения с результатами экспериментальных исследований.

Для решетки профилей ТР-1А представлены следующие результаты расчета течения в межлопаточном канале: распределение безразмерной скорости $\lambda = W / a_{кр}$ во всем канале при безударном угле входа потока $\beta_1 = 21^\circ$ (рис. 1) и распределение безразмерной скорости λ вдоль обвода профиля при углах потока $\beta_1 = 18^\circ, 21^\circ, 26^\circ, 33^\circ$ (рис. 2).

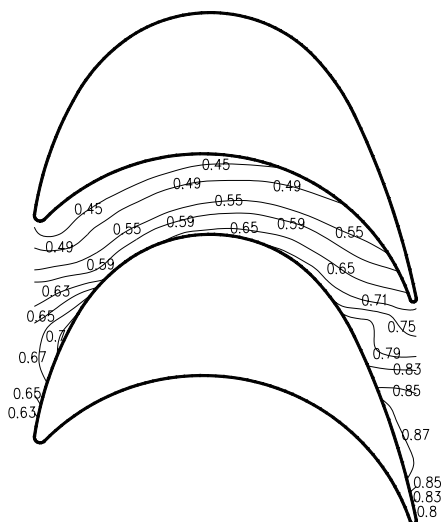
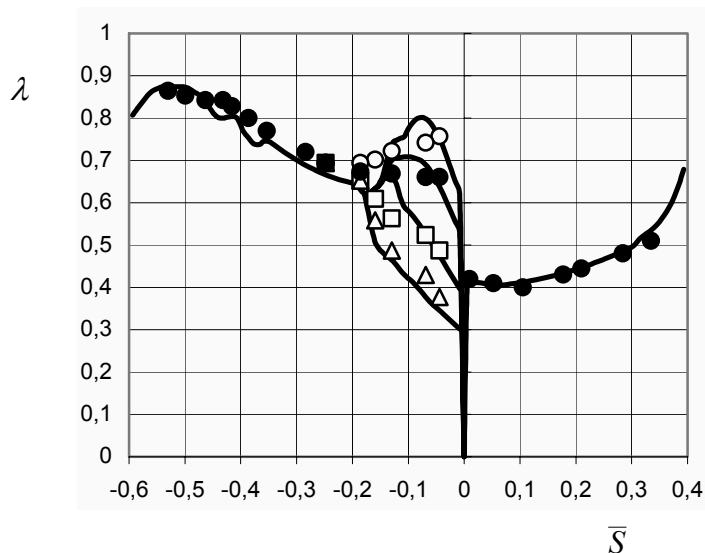


Рис. 1. Распределение безразмерной скорости λ в канале решетки ТР-1А при безударном угле входа потока $\beta_1 = 21^\circ$

На рис. 2 также представлено сравнение результатов расчета с данными экспериментов, проведенных в МЭИ [3]. Скорость определялась по давлению на поверхности лопатки, которое в эксперименте измерялось с помощью дренажных отверстий. Количество отверстий и их расположение на поверхности профиля соответствует значениям \bar{S} для точек • на рис. 2. Экспериментальные данные при углах входа потока, отличных от безударного угла $\beta_1 = 21^\circ$, представлены только для входного участка выпуклой поверхности профиля, поскольку на остальной поверхности они незначительно разнятся с данными при безударном входе.

Для всех углов β_1 на начальном участке вогнутой поверхности профиля $\bar{S} \approx 0 \dots 0,1$ имеется слабодиффузорная область, а вдоль

остальной длины этой поверхности течение конфузурное. На выпуклой поверхности профиля, если отказаться в данный момент от рассмотрения входного участка $\bar{S} = -0,2 \dots 0$, диффузорность течения ($\lambda = 0,8 \dots 0,87$) проявляется только вблизи выходной кромки профиля $\bar{S} = -0,6 \dots -0,55$ (см. рис. 1 и рис. 2).

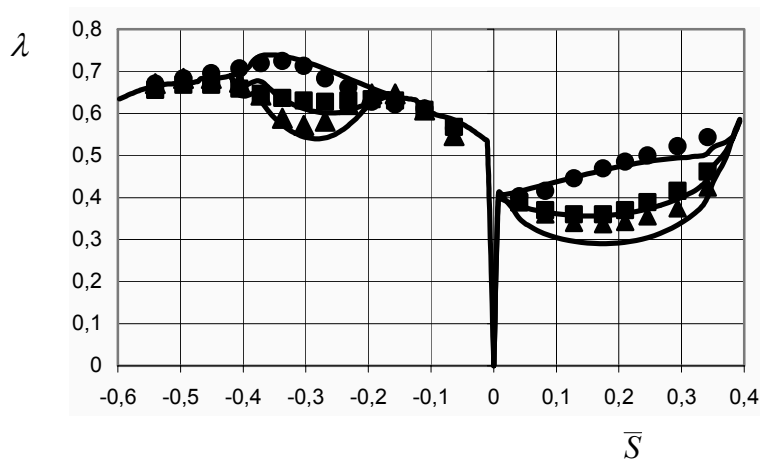


○ - $\beta_1 = 18^\circ$; ● - $\beta_1 = 21^\circ$ (безударный вход); □ - $\beta_1 = 26^\circ$;
 Δ - $\beta_1 = 33^\circ$ – эксперимент МЭИ; — расчет

Рис. 2. Распределение безразмерной скорости λ вдоль обвода профиля ТР-1А при различных углах входа потока

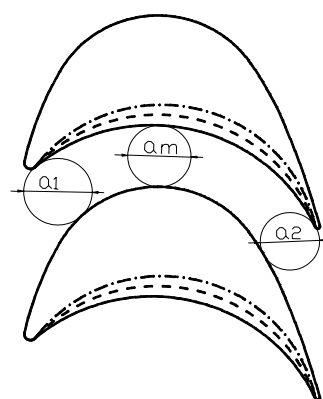
На входном участке выпуклой поверхности профиля $\bar{S} = -0,2 \dots 0$ имеет место диффузорное течение при минимальном угле входа потока в канал $\beta_1 = 18^\circ$ (удар в вогнутую поверхность профиля $\Delta\beta_1 = 3^\circ$). Такому течению соответствует отрицательный градиент скорости потока, как по данным расчета, так и по данным экспериментального исследования. При переходе к большим углам входа диффузорный участок течения на входе уменьшается и при $\beta_1 = 33^\circ$ течение на входном участке становится полностью конфузурным. Данные расчета удовлетворительно согласуются с данными эксперимента (рис. 2).

Расчет течения в решетках ТР-2А и ТР-2Ак (рис. 3) был выполнен для того, чтобы оценить качество предсказания распределения скорости потока вдоль обводов профилей, образующих слабоконфузорные и диффузорно-конфузорных каналы, с помощью разработанного метода решения прямой задачи расчета течения на основе сравнения результатов расчетов с данными экспериментов [6].



● - $\bar{a}_m = 0,92$; ■ - $1,08$; ▲ - $1,23$ – эксперимент;
 — расчет $\bar{a}_m = a_m / a_1$

Рис. 3. Безразмерная скорость λ вдоль обводов профилей ТР-2А и ТР-2Ак



В исходной решетке ТР-2А путем подрезки увеличивали кривизну вогнутой поверхности профиля [6]. Спинка профиля сохранялась неизменной. При этом межлопаточный канал вначале расширялся, а затем суживался. Такое изменение формы канала использовалось для снижения концевых потерь в решетках с относительно короткими лопатками. Наиболее характерные размеры: a_1 – ширина канала на входе, a_m – ширина средней части канала, a_2 – ширина горлового сечения на выходе канала (рис. 3).

Для исходной решетки профилей ТР-2А характерны отношения $\bar{a}_m = a_m/a_1 = 0,92$ и $\bar{a}_1 = a_1/a_2 = 1,16$, а две решетки с подрезкой ТР-2Ак имеют степень диффузорности $\bar{a}_m = 1,08$ и $1,23$ при неизменном значении отношения $\bar{a}_1 = 1,16$.

По мере увеличения диффузорности на входе ($\bar{a}_m > 1$) значительно изменяются эпюры скоростей (рис. 3). В исходном канале ТР-2А течение вдоль выпуклой поверхности профиля конфузорное на участке длины \bar{S} от 0 до $-0,35$, а затем вплоть до выходной кромки течение имеет диффузорный характер. Вдоль вогнутой поверхности профиля течение сохраняется конфузорным по всей ее длине. В каналах ТР-2Ак течение вдоль входного участка спинки до $\bar{S} \approx -0,15$, как и в канале ТР-2А, имеет конфузорный характер. Рост отношения проходных сечений канала на входе \bar{a}_m сопровождается появлением диффузорных участков течения. Существенное снижение скорости получено для канала с самой большой степенью диффузорности $\bar{a}_m = 1,23$ как на выпуклой, так и на вогнутой поверхностях профиля.

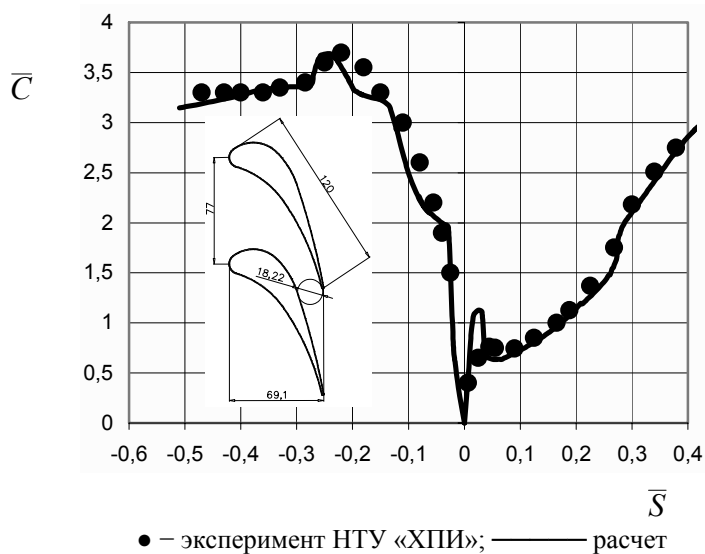


Рис. 4. Распределение безразмерной скорости $\bar{C} = C_i/C_0$ вдоль обвода профиля ТС-1А

уровень скоростей в эксперименте несколько выше.

Основные геометрические характеристики сопловой решетки ТС-1А были следующими: шаг $t=77$ мм, хорда $b=120$ мм, осевая ширина $B=69,1$ мм, $\arcsin a/t=13,7^\circ$ (рис. 4). Эксперимент с данной сопловой решеткой проведен в НТУ «ХПИ» [8] при числе Маха $M=0,4$ и числе Рейнольдса $Re=7 \times 10^5$.

Результаты расчета удовлетворительно совпадают с данными эксперимента для полностью конфузорного канала ТР-2А и диффузорно-конфузорного канала ТР-2Ак с небольшим отношением ширин $\bar{a}_m = 1,08$ как по характеру распределения, так и по уровню величин скоростей. При большой степени диффузорности канала на входе $\bar{a}_m = 1,23$ характеры распределения скоростей на выпуклой и вогнутой поверхностях профиля хорошо согласуются для расчетных и экспериментальных данных, однако из-за влияния пограничного слоя,

Сравнение расчетных данных с экспериментальными данными проведено на основе распределения безразмерных скоростей потока $\bar{C} = C_i/C_0$ вдоль обводов профиля, где C_i – текущее значение скорости, C_0 – скорость на входе в решетку (рис.4). Количество дренажных отборов, выполненных на выпуклой поверхности равно 15 шт., а на вогнутой – 13 шт. Получено удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Вдоль вогнутой поверхности профиля течение полностью конфузорное. Только вблизи входной кромки в расчете наблюдается резкое падение скорости \bar{C} от 1,2 до 0,65, что связано с резким изменением величины и знака кривизны при переходе от относительно небольшого радиуса входной кромки к большому радиусу вогнутой стороны профиля. В эксперименте это падение скорости выражено значительно меньше, по-видимому, из-за вязких эффектов. Вдоль выпуклой поверхности профиля, как по данным расчета, так и по данным эксперимента, на участке от входной кромки до $\bar{S} = -0,25$ течение имеет конфузорным характер, а далее к выходной кромке характер течения меняется на слабодиффузорный. Относительная скорость достигает своего максимального значения $\bar{C} \approx 3,7$ внутри канала вблизи горлового сечения.

Таким образом, разработанный метод решения прямой задачи расчета течения позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать двухмерные безотрывные течения в конфузорных, конфузорно-диффузорных и диффузорных каналах турбинных решеток при различных углах атаки и получать распределения параметров течения в любой точке межлопаточного канала, и, естественно, на поверхностях профиля.

Литература

1. Субботович В.П., Юдин А.Ю. Задача расчета скорости на поверхности лопатки турбомшины как задача оптимизации // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – № 12. – с. 101–106.
2. Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. – М.: Машиностроение, 1965. – 96 с.
3. Дейч М.Е., Самойлович Г.С. Основы аэродинамики осевых турбомашин. – М.: Машгиз, 1959. – 428 с.
4. Газовые турбины авиационных двигателей / Жирицкий Г.С., Локай В.И., Максимова М.К., Стрункин В.А. – М.: Оборонгиз, 1963. – 608 с.
5. Отраслевой стандарт. Турбины паровые стационарные. Лопатки направляющие. Профили рабочей части, их характеристики / Министерство тяжелого и энергетического и транспортного машиностроения. – Москва, 1971. – 118 с.
6. Дейч М.Е., Трояновский Б.М. Исследование и расчеты ступеней осевых турбин. – М.: Машиностроение, 1964. – 628 с.
7. Тарасов А.И., Гуринов А.А., Рассохин Е.В. О моделировании теплообмена на профилях турбины лопаток с помощью CFD программ // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 6. – с. 81–84.
8. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД. – Харьков: Основа. – 1994. – 240 с.