

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;
Д.И. МАКСЮТА, аспирант НТУ «ХПИ»

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАБОТЫ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ С УЧЕТОМ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПРОТЕЧКИ

В работе проведено сравнение численного эксперимента с натурным. Рассчитано течение в изолированной турбинной ступени. Получены интегральные и локальные по высоте характеристики потока. Построена зависимость КПД от размера периферийного зазора. Сделан вывод относительно возможности использования численного эксперимента для решения задач оптимизации изолированной турбинной ступени.

Ключевые слова: верификация *CFD* расчета, изолированная турбинная ступень, коэффициент перемежаемости, утечка в периферийный зазор.

Введение

В настоящее время, одним из наиболее перспективных направлений по оптимизации проточных частей мощных паровых турбин является пространственное профилирование. Сложность этой задачи заключается в ее многопараметричности и, как следствие, в необходимости проведения большого количества экспериментов. Значительно удешевить и ускорить нахождение решения поставленной задачи можно применяя современные методы вычислительной аэродинамики (*CFD*). Однако, использование *CFD* требует всесторонней верификации еще до этапа планирования эксперимента.

Ранее, в работах [1, 2], были представлены результаты верификации данных двух- и трехмерных экспериментов, полученных численным путем. В данной работе представлены результаты верификации численных данных трехмерного расчета изолированной турбинной ступени с учетом периферийных протечек. Данные численного эксперимента сравниваются с натурным экспериментом, проведенным на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» [3].

Постановка задачи

Объект исследования: турбинная ступень, в направляющей решетке которой использован профиль ТС-1АВ, а в рабочей – профиль активного типа Р2. Межвенцовый зазор, надбандажное пространство и выхлопной патрубок формировался отдельным доменом – *ZAZOR*. Общий вид расчетной области представлен на рис. 1.

Граничные условия: $P_1^* = 145500$ Па, $T_1^* = 387$ °К, $P_2 = 100300$ Па, рабочее тело – воздух. Указанным граничным условиям соответствует дозвуковое истечение во всей ступени (числа Маха не превышают $M = 0,78$). Плоскость замера параметров в расчетах располагалась: в межвенцовом зазоре – за доменом направляющих решеток; в выхлопном патрубке – на расстоянии 16 мм от выходной кромки рабочей решетки. Параметры ступени и ее геометрические характеристики в точности соответствуют экспериментально исследованным ступеням на воздушной турбине ВТ-3 кафедры турбиностроения НТУ «ХПИ». Результаты этих экспериментов представлены в диссертационной работе Гончаренко Л.В. [3].

Параметры ступени указаны в таблице 1.

Для получения данных о вязком течении в турбинной решетке численно решалась система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, расчетная

схема TVD второго порядка аппроксимации с локально первым в местах высоких градиентов. Все расчеты проводились в трехмерной постановке. Расчетная сетка для сопла составила $140 \times 98 \times 70$ элементов, для рабочей решетки $120 \times 98 \times 70$ элементов. Домен ZAZOR в общей сложности состоял из 2,2 млн. элементов. Модель турбулентности – $k-\omega$ SST.

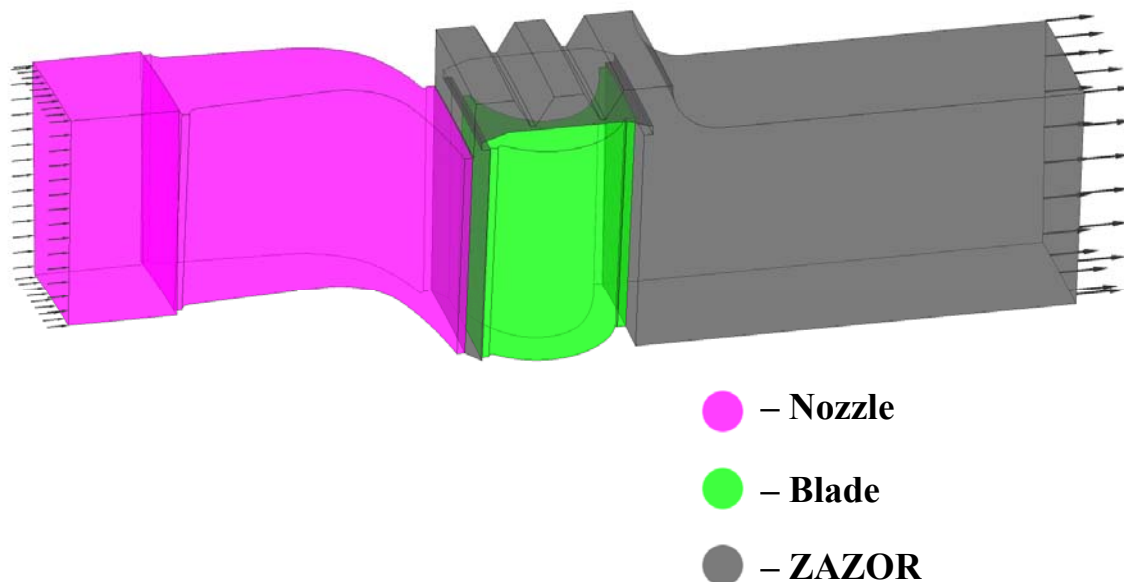


Рис. 1 – Общий вид расчетной области

Таблица 1

Параметры ступени

Параметр	Направляющий аппарат	Рабочее колесо
Ср. диаметр, $d_{ср}$, мм	353	353
Хорда, b , мм	31,8	16
Угол установки, β_v , град	31	14,63
Отн. шаг, t/b	0,514	0,722
Отн. длина, l/b	0,786	1,69
Число лопаток, z , шт.	68	96
Высота лопаток, l , мм	25	27
Обороты ротора, n , об/мин	8145	
Межвенцовый зазор, мм	4	
Радиальный зазор, мм	0,5	

Цель исследования – получение картины течения рабочего тела в ступени турбины, а также проведение качественного и количественного сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными.

Расчетное исследование

Отталкиваясь от поставленной цели исследования, был проведен численный расчет исследуемой ступени в программном комплексе ANSYS CFX.

Следует отметить, что в параметрах модели турбулентности был задан изменяющийся коэффициент перемежаемости, который зависел от расстояния от входа в канал (рис. 2). Выбор данного распределения обусловлен логическими заключениями

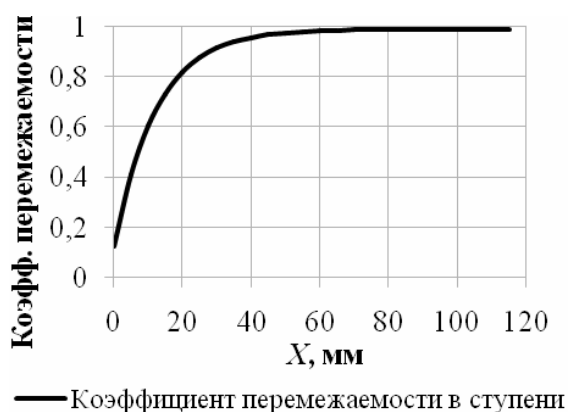


Рис. 2 – Розподілення коефіцієнта переважаємості по довжині турбінної ступені

относительно ламинарно-турбулентного перехода в турбинной ступени: на входе в расчетную область пограничный слой практически полностью ламинарен; затем, при достижении входной кромки направляющего аппарата, степень турбулентности растет и достигает своего максимума при приближении к межвенцовому зазору. Таким образом, начиная с межвенцового зазора и далее по каналу, формируется турбулентный пограничный слой, что хорошо согласуется с общепринятыми понятиями о физике процесса истечения в турбинной решетке.

Расчет был выполнен в трехмерной постановке. Точность полученных результатов составила 10^{-6} . Интегральные характеристики течения в ступени сведены в таблице 2.

Таблица 2

Интегральные характеристики работы ступени

Параметр	Эксперимент	Расчет
Расход, кг/с	1,63	1,61
КПД, %	85	83,46
Потери в сопле, %	3,15	4,99
Потери в лопатке, %	8,15	7,30
Потери с вых. скоростью, %	5,19	5,18

Кроме интегральных характеристик, были получены локальные распределения параметров потока по высоте ступени в межвенцовом зазоре и за рабочей решеткой. Полученные зависимости представлены на рис. 3–10.

Проанализировав полученные зависимости можно сделать вывод о качественно хорошем совпадении расчетных и экспериментальных данных. Приемлемые расхождения расчетных и экспериментальных данных вызвано, в первую очередь, невозможностью точно воспроизвести все условия эксперимента.

Отметим, что в таблице 2, где представлены интегральные характеристики работы ступени, наблюдается некоторое несоответствие интегральных потерь между экспериментом и расчетом. Однако, если в качестве критерия точности взять баланс потерь и КПД, то окажется, что данные полученные расчетным путем ближе к истинной картине течения (100,93 % в численном эксперименте против 101,49 % в натурном эксперименте). Такая ситуация является вполне приемлемой, поскольку задача верификации ставилась для проведения дальнейшей пространственной оптимизации ступени, в которой функцией цели будет выступать КПД ступени.

Помимо интегральных и локальных характеристик потока, была получена зависимость КПД ступени от величины радиального зазора (рис. 11). Для этого было выполнено три расчетных эксперимента этой же ступени с радиальными зазорами 0,5 мм, 1,0 мм, 1,5 мм. Полученная зависимость удовлетворяет задаче верификации в выбранной постановке, поскольку в интересующих нас диапазонах радиальных зазоров

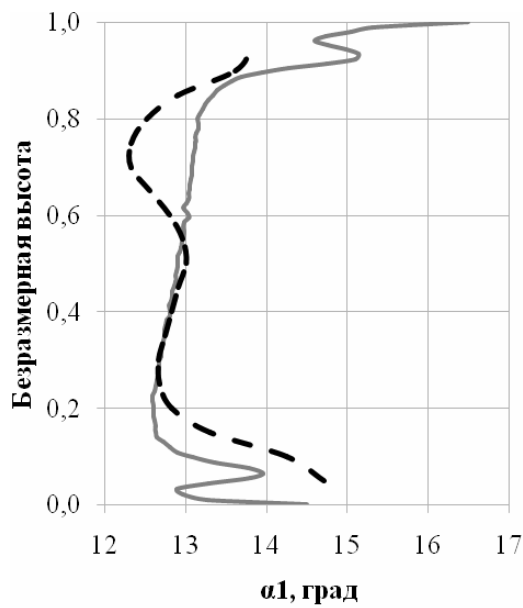


Рис. 3 – Распределение угла выхода потока из направляющей решетки в абсолютном движении по высоте ступени

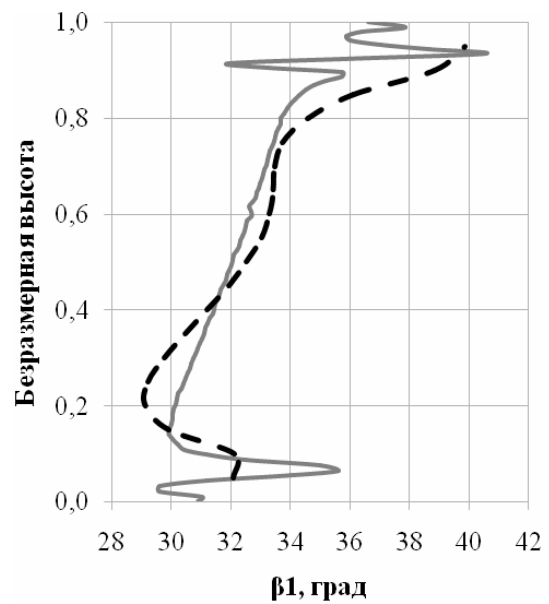


Рис. 4 – Распределение угла выхода потока из направляющей решетки в относительном движении по высоте ступени

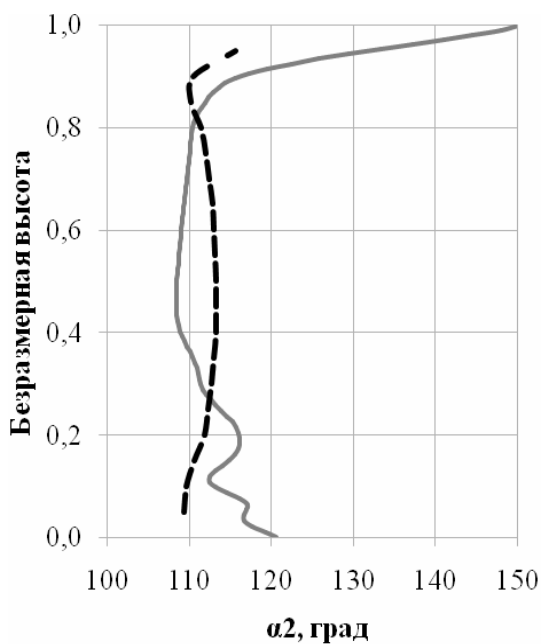


Рис. 5 – Распределение угла выхода потока из рабочей решетки в абсолютном движении по высоте ступени

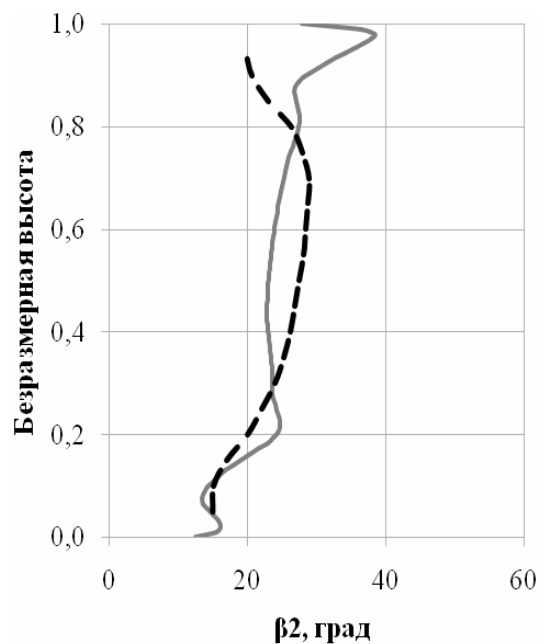
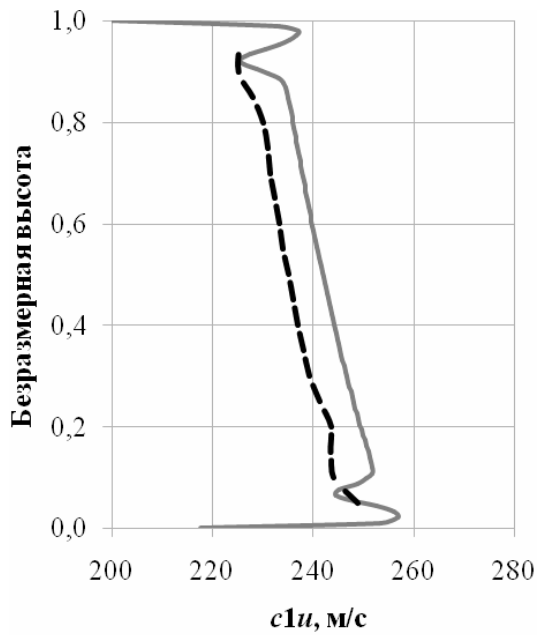
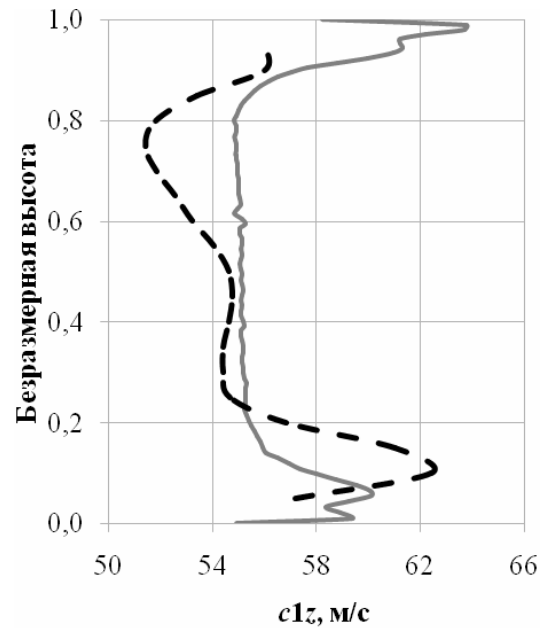


Рис. 6 – Распределение угла выхода потока из рабочей решетки в относительном движении по высоте ступени



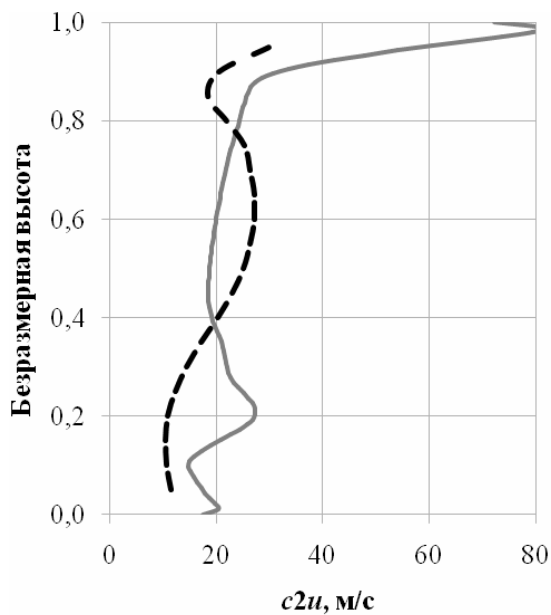
— расчет — эксперимент

Рис. 7 – Распределение абсолютной скорости потока в окружном направлении по высоте ступени в межвенцовом зазоре



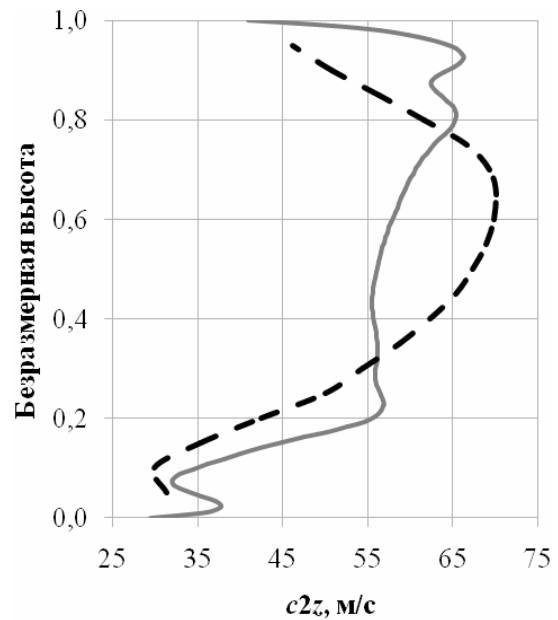
— расчет — эксперимент

Рис. 8 – Распределение абсолютной скорости потока в осевом направлении по высоте ступени в межвенцовом зазоре



— расчет — эксперимент

Рис. 9 – Распределение абсолютной скорости потока в окружном направлении по высоте ступени за рабочей решеткой



— расчет — эксперимент

Рис. 10 – Распределение абсолютной скорости потока в осевом направлении по высоте ступени за рабочей решеткой

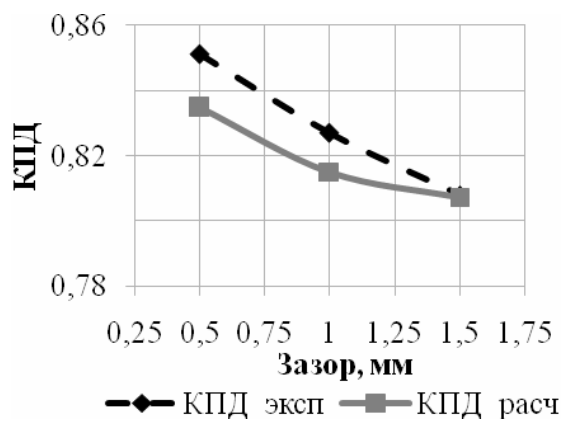


Рис. 11 – Залежність ККД ступені
от величини радіального зазора

(0,5–1,0 мм) лінії для розрахункового і експериментально отриманого ККД являються еквидагантними. Крім того, використовуючи методи *CFD*, вдалося виміряти процентне співвідношення витрати робочого тіла в надбандажне ущільнення до загальної витрати через ступінь. Ця величина змінювалася від 2,91 % до 5,66 % для зазорів 0,5–1,5 мм відповідно. В натурному експерименті аналогічні вимірювання провести було неможливо.

Вывод

1 Сравнение *CFD* расчетов с данными натурального эксперимента

показало приемлемое качественное и количественное совпадение картины течения рабочего тела в реальной модельной турбинной ступени с результатами 3D расчетных исследований, проведенными с учетом периферийных протечек.

2 Верификация поставленной 3D расчетной задачи позволяет перейти к следующему этапу – созданию оптимальной ступени с учетом не только потерь в направляющих и рабочих лопатках, но и протечек в радиальных уплотнениях.

Список литературы: 1. Бойко, А.В. Исследование влияния параметров модели турбулентности на результаты *CFD* расчета турбинной решетки при различных углах атаки [Текст] / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, Д.И. Максютя // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 6. – С. 19-23. – ISSN 2078-774X 2. Бойко, А.В. Численный расчет влияния удара на рабочую лопатку при работе в ступени [Текст] / А.В. Бойко, М.В. Бурлака, Д.И. Максютя // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2012. – № 7. – С. 24-28. – ISSN 2078-774X 3. Гончаренко, Л.В. Исследование турбинных ступеней с повышенной нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.01: защищ. 20.12.1979 / Гончаренко Леонид Васильевич. – Х., 1979. – 205 с.

Поступила в редколлегию 18.01.13

УДК 621.165

Верификация численного расчета работы ступени осевой турбины с учетом периферийной протечки [Текст] / А.В. Бойко, Д.И. Максютя // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013. – № 13(987). – С. 18-23. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2078-774X.

В роботі проведено порівняння чисельного експерименту з натурним. Розрахована течія в ізольованій турбінній ступені. Отримані інтегральні та локальні по висоті характеристики потоку. Побудована залежність ККД від розміру периферійного зазору. Зроблено висновок стосовно можливості використання чисельного експерименту для вирішення задач оптимізації ізольованої турбінної ступені.

Ключові слова: верифікація *CFD* розрахунку, ізольована турбінна ступінь, коефіцієнт перемешованості, витік у радіальний зазор.

The comparison between numerical experiment and natural experiment was done. The isolated turbine stage flow was calculated. Integral and local height characteristics of the flow were obtained. Dependency of performance from the height of peripheral clearance was built. Conclusion about ability of using numerical experiment for solving isolated turbine stage optimization problems was made.

Keywords: verification of *CFD* calculation, isolated turbine stage, intermittency coefficient, outflow in peripheral clearance.