

УДК 621.165

**В. П. СУББОТОВИЧ**, д-р техн. наук, с.н.с.; проф. НТУ «ХПИ»;  
**А. Ю. ЮДИН**, канд. техн. наук, с.н.с.; доц. НТУ «ХПИ»;  
**С. А. ТЕМЧЕНКО**, м.н.с. НТУ «ХПИ»

## РАСЧЕТ ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ ПО ЗАЗОРАМ КАК РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В СВОБОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Представлены результаты сравнения расчетов ступени осевой турбины с данными ее экспериментальных исследований. Расчеты выполнены с помощью нового метода расчета осесимметричного течения в свободных кольцевых каналах. Кольцевой канал рассматривается как чередующиеся участки двух типов: свободные участки и участки, загроможденные некоторыми устройствами, способными изменять углы закрутки потока. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений параметров потока.

**Ключевые слова:** проточная часть, межвенцовый зазор, обратная задача, линия тока, турбинная ступень.

### Введение

Одними из важных элементов осевых турбомашин являются диффузорные устройства выхлопных и переходных патрубков. Повышение эффективности этих элементов в большинстве случаев производится путем экспериментальных исследований или использования расчетных исследований численными методами (*CFD*-программы). Экспериментальные исследования требуют значительных затрат средств и времени, а в свою очередь *CFD* программы требуют обязательной верификации с физическим экспериментом. Это усложняет решение проблемы улучшения аэродинамических характеристик диффузорных устройств, работающих совместно со ступенями турбины. Поэтому представляется актуальным использование обратных аэродинамических задач, которые позволяют получать качественно новые конструктивные решения за разумное время.

### Постановка задачи исследования

Разработанный авторами метод [1, 2] позволяет, как рассчитывать течение в каналах с известной геометрией (прямая задача), так и проектировать каналы под заданные аэродинамические условия (обратная задача). Но всегда остается актуальным вопрос выбора аэродинамических условий, для которых необходимо спроектировать диффузорное устройство, а именно: это выбор параметров ядра потока внутри диффузора и выбор параметров потока во входном сечении диффузора. Для того чтобы задать параметры потока на входе в диффузор необходимо знать параметры за последней ступенью отсека (цилиндра) турбины, либо за направляющим аппаратом, который может устанавливаться перед диффузором. Чтобы решить эту задачу, был разработан метод для определения параметров осесимметричного потока в кольцевом канале, внутри которого расположены устройства, способные изменять углы закрутки потока [3]. Для получения достоверных характеристик потока на входе в диффузор необходимо провести тестирование метода и сравнить данные расчетов с данными экспериментальных исследований.

### Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана ступень осевой турбины, которая была испытана на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ». Данные экспериментов

© В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, С.А. Темченко, 2014

любезно предоставлены кандидатом технических наук, доцентом Гребневым В.К.

Геометрические характеристики ступени приведены на рис. 1. Ступень имеет цилиндрические рабочие и сопловые лопатки.

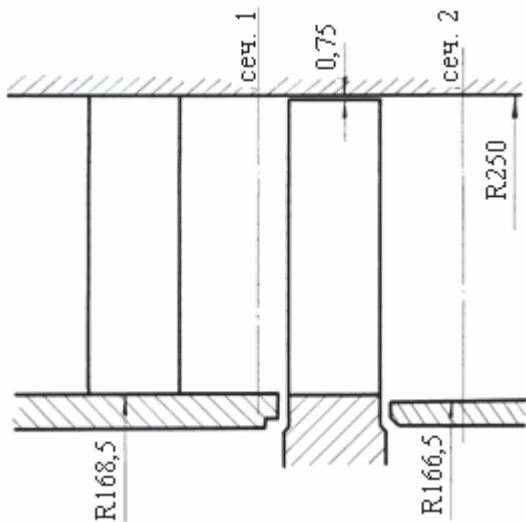


Рис. 1 – Геометрические характеристики ступени

Полные параметры на входе в ступень:  $P_0^* = 800 \text{ кг/м}^2$ ,  $v_0^* = 0,91 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Расход воздуха через ступень  $G = 2,69 \text{ кг/с}$ .

#### Метод решения аэродинамической задачи

Детально этот метод описан в работе [3]. Полагается, что кольцевой канал состоит из чередующихся участков двух типов: свободных участков и участков, загроможденных некоторыми устройствами, способными изменять углы закрутки потока. Расчёт течения производится в торцевом сечении свободного участка. Рабочее тело – сжимаемое и невязкое, а течение – установившееся, адиабатическое,

осесимметричное и безотрывное.

Для описания течения рабочего тела использовались следующие уравнения, записанные в цилиндрической системе координат: 1) уравнение сохранения энергии вдоль линии тока; 2) уравнение изоэнтропийного процесса вдоль линии тока; 3) уравнение неразрывности; 4) проекция уравнения количества движения на радиальное направление; 5) проекция уравнения количества движения на осевое направление.

Введена функция тока, и система из пяти уравнений сведена к системе двух уравнений [3], к дифференциальному уравнению и аналитическому. Задача расчета течения в выбранном сечении свободного участка кольцевого канала – задача нелинейного программирования, независимыми переменными которой выступают неизвестные вещественные коэффициенты функции тока, а целевая функция – сумма квадратов невязок по расходу, определяемых из уравнения сохранения энергии.

#### Результаты расчета параметров потока за сопловым аппаратом ступени

Для определения параметров рабочего тела (воздуха) за сопловым аппаратом (сеч. 1 на рис. 1) были заданы: полное давление и удельный объем на входе в ступень, расход рабочего тела, показатель адиабаты, а также распределение по высоте сечения 1 угла потока  $\alpha_1$  и квадрата коэффициента скорости сопловой решетки  $\varphi^2$  (рис. 2). Эти данные были взяты на основе результатов экспериментальных исследований.

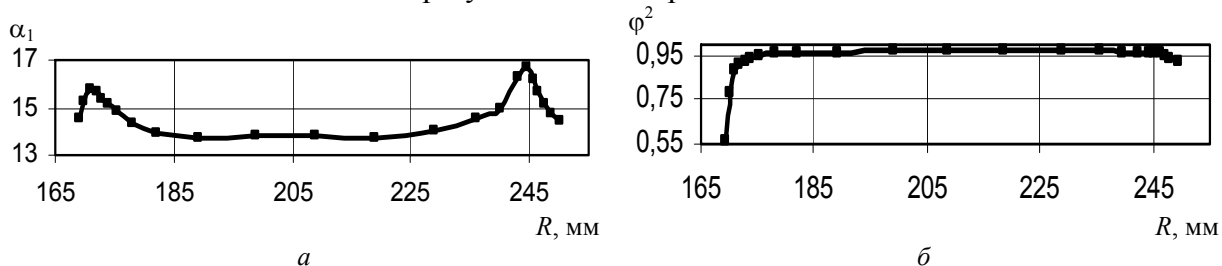


Рис. 2 – Экспериментальные распределения угла потока  $\alpha_1$  а и квадрата коэффициента скорости  $\varphi^2$  б по высоте сечения 1

В результате проведенного расчета в сечении  $I$  были получены распределения расхода, статического давления, скорости и её составляющих по высоте решетки.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показано на рис. 3, где представлены распределения статического давления  $P$  и двух составляющих скорости  $\bar{C}_{1z}$  и  $\bar{C}_{1u}$  вдоль сечения  $I$  (скорости отнесены к скорости  $C_0$ , эквивалентной перепаду на ступень).

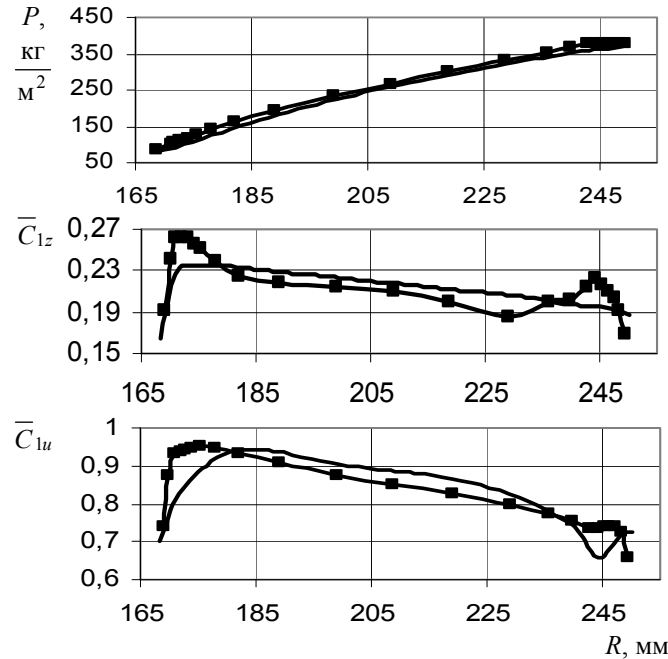


Рис. 3 – Распределения параметров потока за сопловым аппаратом:  
 —■— эксперимент; ——— расчет

Хорошее совпадение получено для статического давления. Для распределений составляющих скоростей наибольшие различия имеют место в корневых и периферийных зонах. Это можно объяснить влиянием на характер течения концевых явлений, связанных с вторичными течениями в этих зонах.

**Результаты расчета параметров потока в канале за рабочим колесом**

Для определения параметров потока за рабочим колесом (сеч. 2, рис. 1) исходные данные отличались от расчета за сопловым аппаратом, так как известно экспериментальное распределение полного давления за рабочим колесом. Для расчета задавались расход рабочего тела,

показатель адиабаты, а в сечении 2 – распределения по высоте угла потока  $\beta_2$  и распределение удельного объема и полного давления  $P_2^*$ . На рис. 4 показаны распределения угла потока  $\beta_2$  и полного давления  $P_2^*$ , полученные экспериментально.

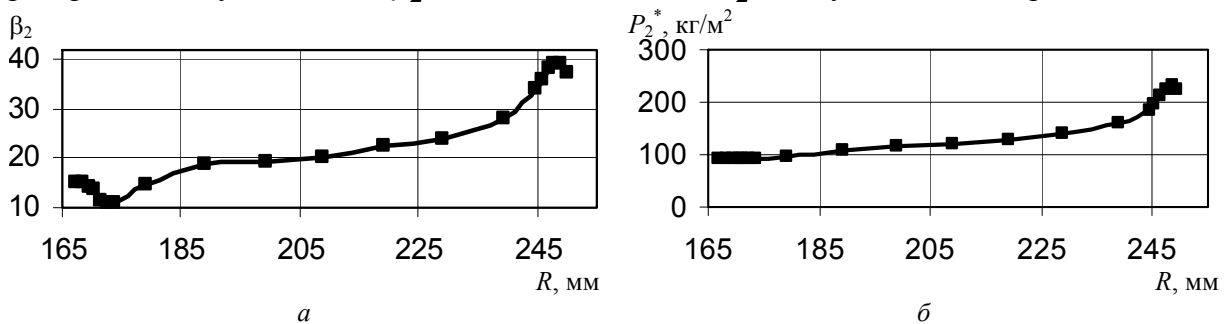


Рис. 4 – Экспериментальные распределения угла  $\beta_2$  а и полного давления  $P_2^*$  б по высоте за рабочим колесом

Как и при расчете сечения  $I$  за сопловым аппаратом, в сечении 2 за рабочим колесом получены распределения расхода, статического давления, скорости и её составляющих по высоте решетки.

На рис. 5 представлены распределения статического давления  $P_{2ст}$  и двух составляющих скорости  $\bar{C}_{2z}$  и  $\bar{C}_{2u}$  вдоль радиуса. Из рисунков видно, что расчет в

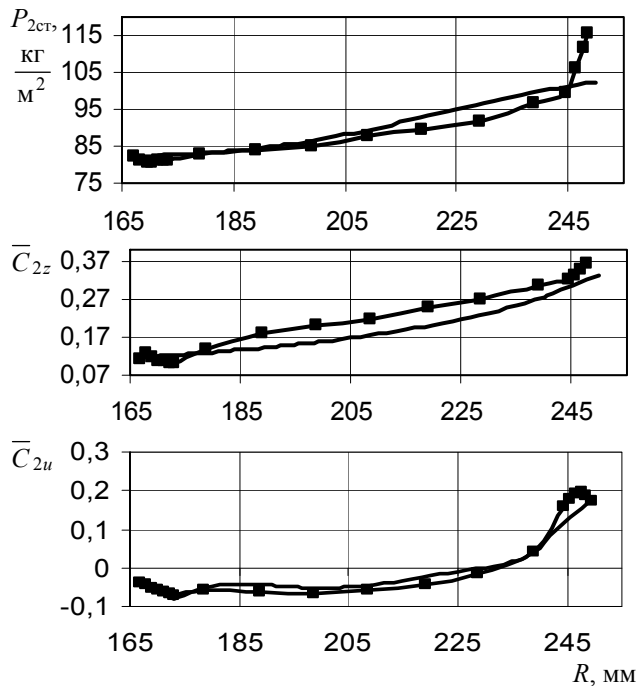


Рис. 5 – Распределения параметров потока за рабочим колесом:

■ эксперимент; — расчет

сечении 2 дает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных в ядре потока. Отличия в корневой зоне и периферийной зоне объясняются влиянием вторичных течений и периферийной протечки.

#### Выводы

Сравнения результатов расчетного исследования турбинной ступени с данными физического эксперимента подтверждают, что новый метод решения аэродинамических задач для свободных кольцевых каналов позволяет с приемлемой точностью определять распределения параметров потока по радиусу за решетками ступеней турбины, что позволит рассчитывать и проектировать многоступенчатые отсеки турбин, а также использовать данные расчетов для предварительного проектирования выходных диффузорных устройств.

**Список литературы:** 1. Субботович, В. П. Метод расчета течения в осерадиальных кольцевых каналах [Текст] / В. П. Субботович, А. Ю. Юдин, С. А. Темченко // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – № 6. – С. 24–27. – ISSN 2078-774X. 2. Субботович, В. П. Результаты тестирования метода расчета течения в кольцевых каналах [Текст] / В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. Ю. Юдин, С. А. Темченко // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012 – № 8. – С. 91–94. – ISSN 2078-774X. 3. Субботович, В. П. Определение параметров осесимметричного потока в торцевом сечении кольцевого канала [Текст] / В. П. Субботович, С. А. Темченко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПІ»: сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2008. – № 6. – С. 52–55.

**Bibliography (transliterated):** 1. Subbotovich, V. P., A. Ju. Judin and S. A. Temchenko. "Metod rascheta techenija v oseradial'nyh kol'cevyyh kanalah." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja. Visnyk NTU "HPI"*. No. 6. Kharkiv: NTU "HPI", 2011. 24–27. ISSN 2078-774X. Print. 2. Subbotovich, V. P., et al. "Rezultaty testirovanija metoda rascheta techenija v kol'cevyyh kanalah." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja. Visnyk NTU "HPI"*. No. 8. Kharkiv: NTU "HPI", 2012. 91–94. ISSN 2078-774X. Print. 3. Subbotovich, V. P., and S. A. Temchenko. "Opredelenie parametrov osesimmetrichnogo potoka v torcevom sechenii kol'cevogo kanala." *Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie. Vestnik NTU "HPI"*. No. 6. Kharkov: NTU "HPI", 2008. 52–55. Print.

Поступила (received) 18.02.2014