

А. В. Бойко, д-р техн. наук
Ю. Н. Говорущенко, канд. техн. наук
В. С. Баранник
А. Р. Хамидулин

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

e-mail: anatoliboiko@yahoo.com,
valentin.barannik@gmail.com

Ключові слова: останні ступені парової турбіни, кут розкриття, форма меридіонального обводу, вторинні течії, метод теорії планування експерименту, оптимізаційна задача.

УДК 621.165

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ОБВОДА НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА НА ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЯ В СОПЛОВОЙ РЕШЕТКЕ

Розглянуто вплив форми меридіонального обводу направляючого апарату з розкриттям на характер течії в решітці. Проведена оптимізація меридіонального обводу даної решітки в периферійній області. Показано зменшення втрат від вторинних течій при використанні оптимальної форми розкриття проточної частини. Наведені картина ліній току в міжлопатковому каналі та розподіл втрат по висоті для початкового та оптимального варіантів направляючої решітки.

Введение

Последние ступени мощных паровых турбин, работающие в области интенсивного изменения удельного объема, выполняют с различной высотой лопатки по входной и выходной кромкам, что и определяет меридиональное раскрытие проточной части.

Как правило, переход от входной к выходной кромке имеет прямолинейную конусную форму. Обтекание таких решеток потоком вязкой жидкости связано с дополнительными потерями, приводящими к снижению эффективности как ступени, так и турбины в целом.

В 60-е годы прошлого столетия проведен ряд физических экспериментов, которые подтвердили существенное влияние угла раскрытия проточной части и величины перекрыши на характер течения в ступени [1, 2]. Указанные экспериментальные исследования подтвердили необходимость решения задачи нахождения оптимальной формы меридионального раскрытия проточной части с целью повышения ее эффективности.

Развитые в последнее десятилетие методы вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют ставить задачу нахождения оптимальной формы меридиональных обводов без существенных материальных затрат. При этом огромное значение имеет проверка достоверности расчетных исследований с физической картиной течения в решетках турбомашин [3].

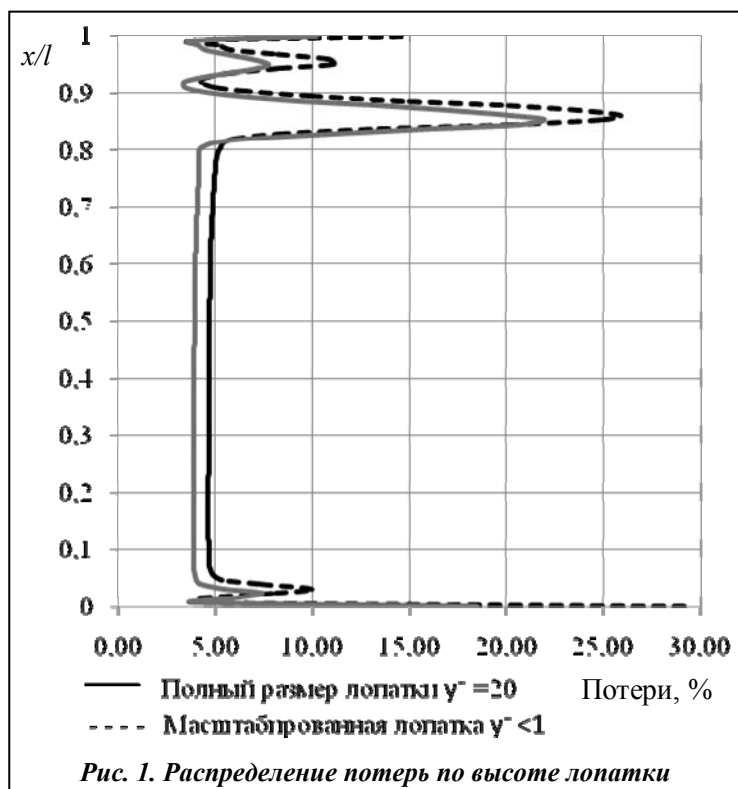
Постановка задачи

Как объект исследования была выбрана направляющая решетка второй ступени ЦНД турбины К-1250-6,9/2,5 с раскрытием проточной части порядка 45°. Цель исследования – изучение характера вторичных течений в периферийной части межлопаточного канала, вызванных отрывом потока во входном участке решетки. Направляющий аппарат данной ступени имеет переменный по высоте профиль. Так как целью исследования было изучение концевых потерь в решетке, для упрощения задачи было решено выполнить перо лопатки с постоянным профилем по высоте. Принятое допущение в основном связано с профильными потерями и несущественно влияет на характер течения в прикорневых областях и величину концевых потерь, однако заметно упрощает задачу построения сеток в изучаемой области течения рабочего тела.

Параметры решетки соответствуют:

- шаг решетки $t = 0,079115$ м;
- относительный шаг $t/b = 0,79123$;
- эффективный угол выхода потока $\alpha_{13} = 15,2055^\circ$;
- горло решетки $a = 0,0207504$ м;
- высота направляющей лопатки по входной кромке $l_1 = 0,277$ м;

© А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, В. С. Баранник, А. Р. Хамидулин, 2015



- высота направляющей лопатки по выходной кромке $l_2 = 0,335$;
- угол установки $\alpha_y = 55^\circ$.

Граничные условия при постановке задачи выбраны следующие:

- полное давление на входе в решетку $P_0^* = 1,2$ атм;
- полная температура на входе $P_1 = 1$ атм;
- статическое давление на выходе $T_0^* = 40$ °С.

Выбор параметров расчетной области

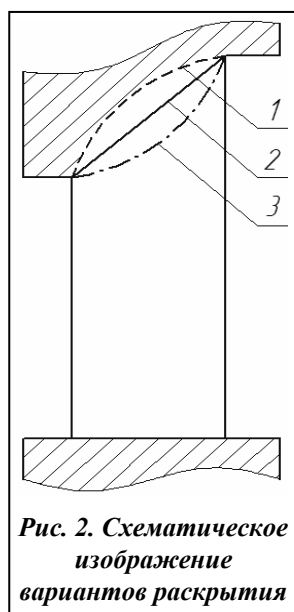
Одним из важнейших моментов исследования структуры течения в турбинных решетках с использованием CFD является определение параметров ячеек расчетной области, что напрямую связано с качеством расчетного исследования.

При этом основным критерием качества принималось значение параметра y^+ , который в нашем случае в первом приближении был равен 20, что является удовлетворительным при определении

структуры течения, однако может дать существенную погрешность при определении потерь в решетке, а значит, при решении задачи оптимизации.

Одним из путей повышения качества расчетного исследования является увеличение количества расчетных элементов, то есть уменьшение их размера. Данный подход неизбежно приводит к увеличению требований к вычислительной технике и длительности времени расчетов.

Следует подчеркнуть, что данная ступень работает в зоне автомодельности ($Re \approx 10^6$), в которой число Рейнольдса незначительно влияет на величину потерь в решетке. Изменение масштаба объекта исследования в 10 раз позволило остаться в зоне автомодельности ($Re \approx 10^5$), увеличив при этом качество расчетной сетки путем уменьшения размеров ее ячеек. В нашем исследовании количество ячеек составляет 1 млн.



На рис. 1 приведено распределение потерь по высоте лопатки для вариантов с различным значением величины y^+ .

Как видно из рисунка, уменьшение параметра y^+ , напрямую связанное с масштабированием лопатки, привело к изменению значения интегральных потерь. При этом качественная картина течения существенно не изменилась, что говорит о возможности использования масштабированной расчетной модели.

Как показывают исследования, проведенные на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ», наибольшее совпадение с физическим экспериментом при использовании выбранной модели турбулентности достигается при значении $y^+ < 1$, что соответствует масштабированной модели решетки.

Исходя из этого все дальнейшие исследования проводились с использованием масштабированной модели решетки.

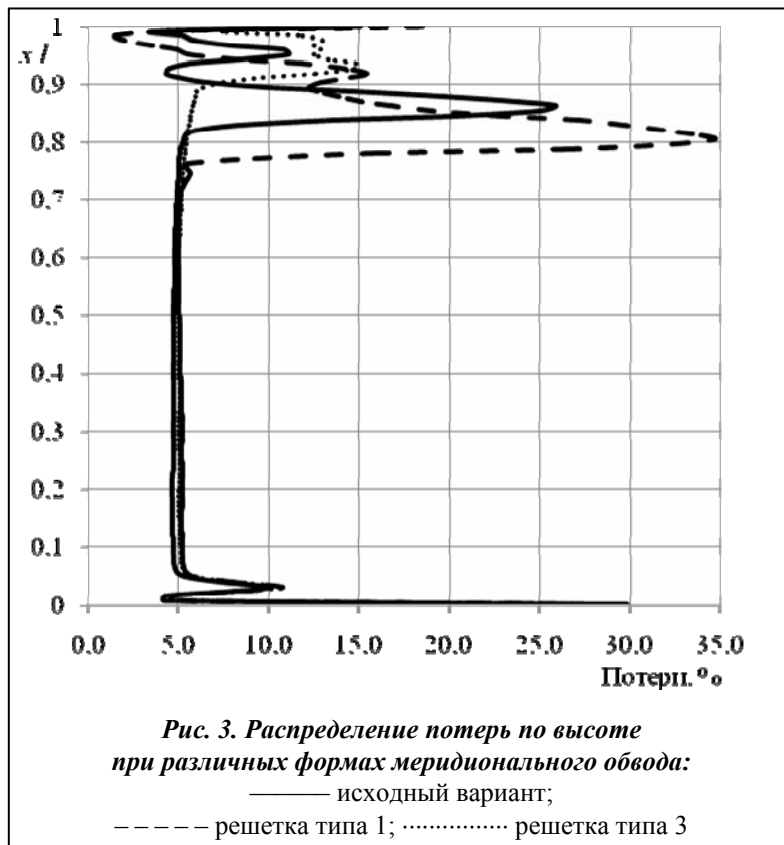
Предварительные расчеты

Постановка оптимизационной задачи подразумевает проведение ряда предварительных расчетов по влиянию формы раскрытия направляющего аппарата и выбору необходимого и достаточного количества варьируемых параметров.

Для предварительного анализа влияния формы раскрытия проточной части к рассмотрению, помимо исходного варианта 2, были приняты еще два типа обвода 1 и 3, изображенных на рис. 2.

Сравнение полученных результатов производилось по распределению потерь по высоте лопатки (рис. 3). Так как изменение геометрии межлопаточного канала происходило только в периферийной области канала, потери в ядре потока и в корневой области остаются постоянными. Изменение значения интегральных потерь происходит из-за влияния различных типов раскрытия проточной части на структуру течения потока на периферии лопаток.

Из рис. 3 видно, что изменение формы раскрытия существенно влияет на структуру течения в периферийной области решетки. При этом вогнутое плавное изменение меридионального обвода приводит к уменьшению величины потерь в периферийной области по сравнению с исходным вариантом. В свою очередь, решетка типа 1 (выпуклое изменение меридиональных обводов) имеет выше значение потерь, что приводит к существенному увеличению значения интегральных потерь. Ниже приведены результаты предварительных расчетов. Для более детального анализа структуры течения в рассмотренных вариантах на рис. 4 приведено распределение линий тока в канале направляющей решетки.



Результаты тестовых расчетов

Профиль	Исходный	Решетка типа 1	Решетка типа 2
Потери, %	6,14750	6,10812	7,64754

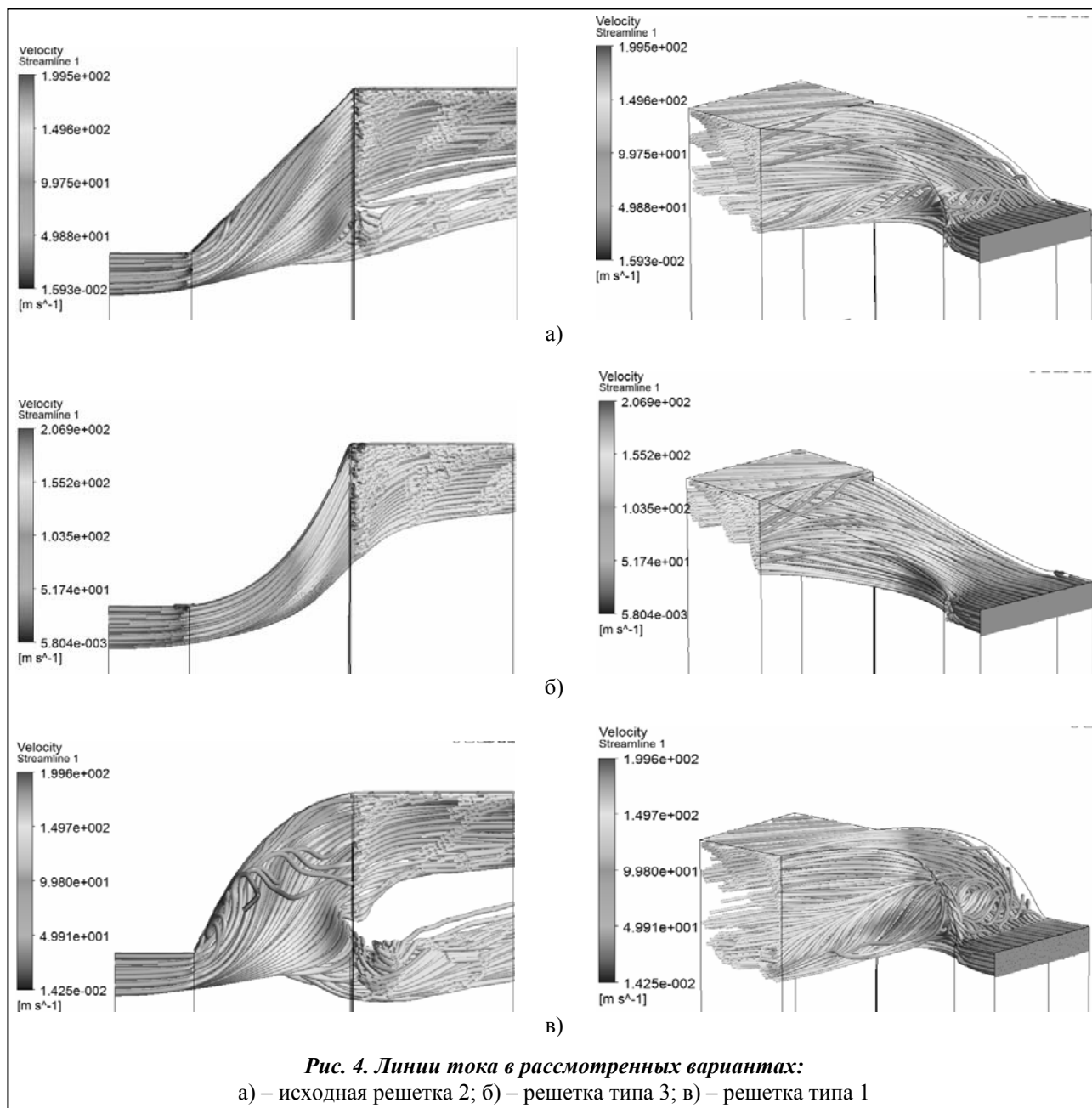
Из рис. 4 видно, что причиной резкого увеличения потерь решетки типа 1 является отрыв потока во входной ее части, который в дальнейшем развивается в мощную вихревую структуру. Подобный срыв потока наблюдается и в исходной решетке, однако его интенсивность значительно ниже. Структура течения решетки типа 3 с гладким вогнутым изменением меридионального обвода является достаточно плавной без образования отрывов, что приводит к положительному эффекту.

Оптимизация формы меридионального обвода

В результате предварительных расчетов получена качественная форма меридионального обвода, соответствующая меньшему значению интегральных потерь относительно исходной решетки. При оптимизации за основу взята эта форма.

Построение формы меридионального обвода осуществлялось с помощью кривой Безье, опирающейся на полигон, образованный точками (рис. 5). В общем случае параметрическая модель меридионального обвода позволяет варьировать четырьмя точками в осевом и радиальном направлениях (итого 8 параметров).

При проведении всех расчетов за ограничение приняты координаты точек входной и выходной кромок (1 и 4), а изменение формы раскрытия проточной части осуществлялось варьированием координат двух промежуточных точек (2 и 3), что позволяет производить построение формы обвода любой сложности.

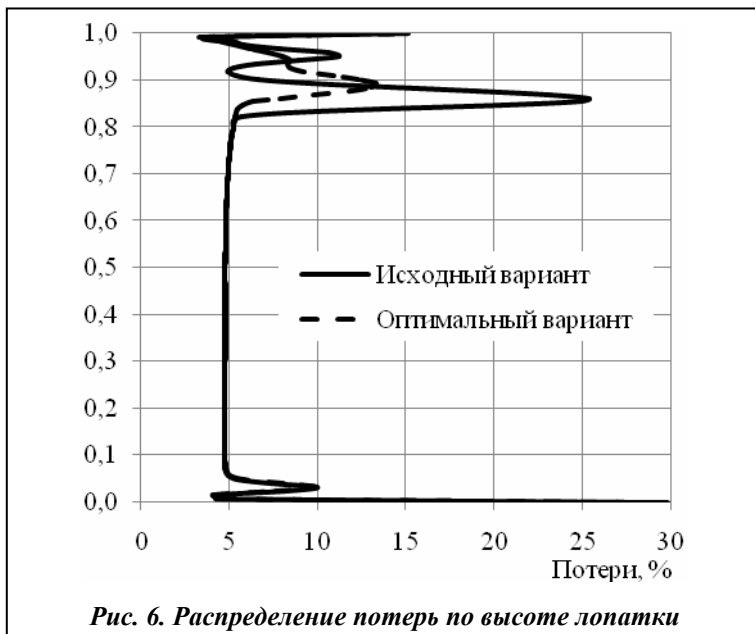
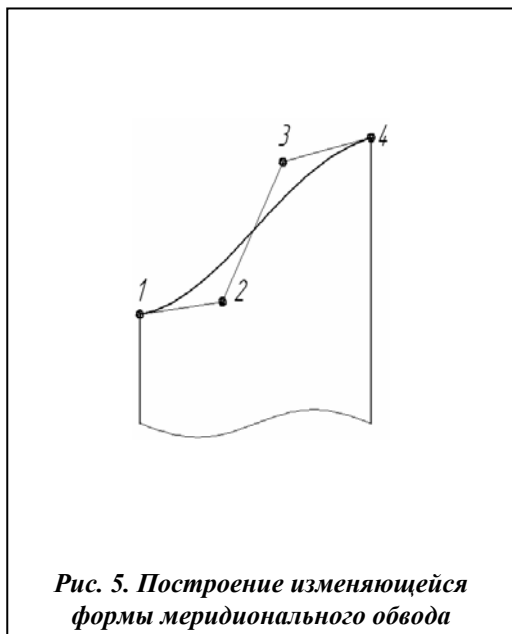


Поиск оптимального решения производили с использованием теории планирования эксперимента и ЛП – поиска [4].

Результаты первой итерации оптимизации показали возможность повышения эффективности турбинной решетки на 4,25% в относительных величинах. Помимо этого, было замечено, что все рассчитываемые точки плана, имеющие КПД выше исходного варианта, устремлялись в сторону равенства нулю радиальной составляющей потока на входе и выходе из решетки.

Так как в качестве кривой, описывающей форму меридионального обвода, использовалась кривая Безье, то для обеспечения радиальной составляющей потока, равной нулю, радиальные координаты варьируемых точек 2 и 3 (рис. 5) были приняты равными радиальным координатам точек входной и выходной кромок соответственно.

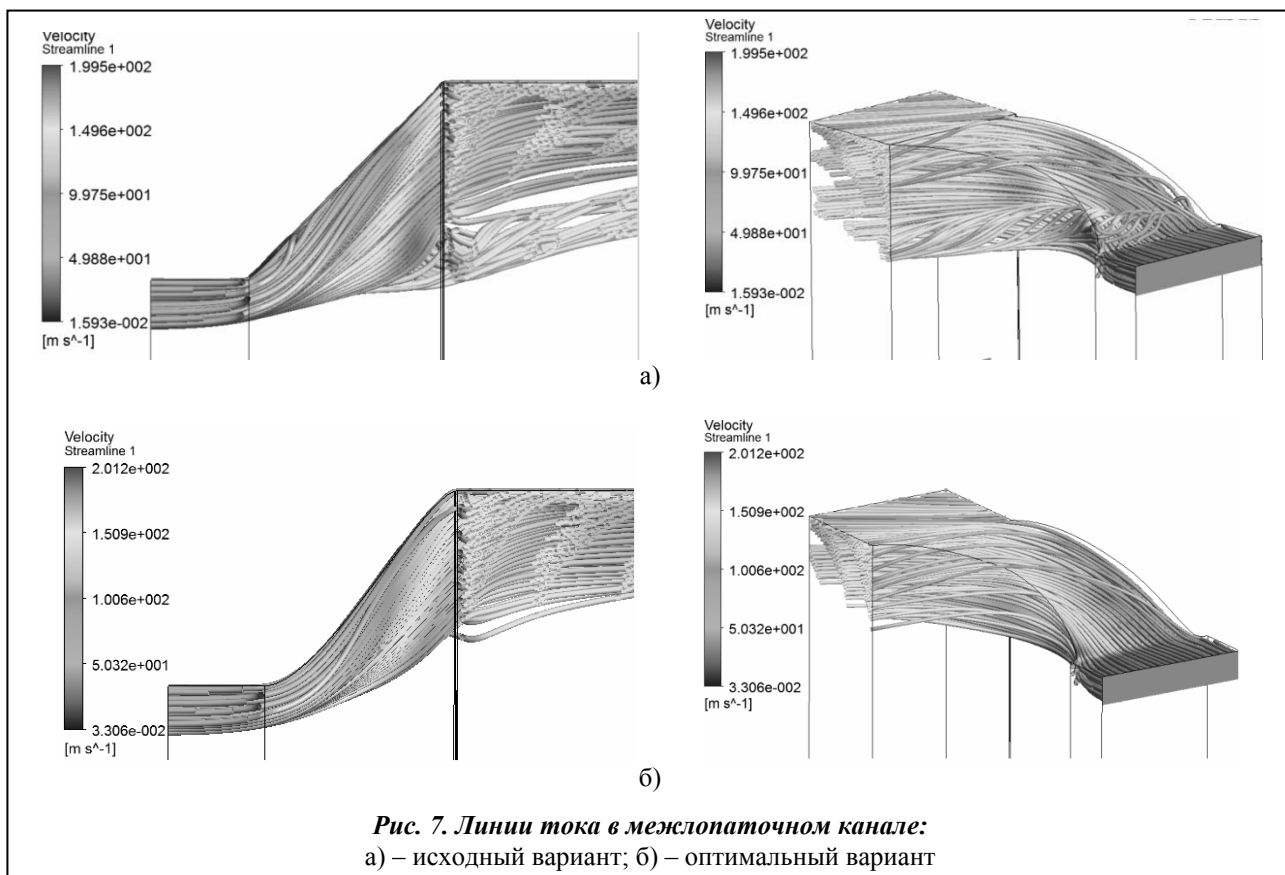
Исходя из вышесказанного поиск оптимальной формы заключался в варьировании двух параметров по оси X , позволяющих получать достаточно большое количество различных форм меридионального обвода решетки при равенстве нулю радиальной составляющей потока на входе и выходе из решетки.



Оптимизация в этой постановке показала, что сохранение осевого входа и выхода потока позволяет достичь повышения эффективности решетки на 7,5% относительно исходного варианта.

Для анализа полученных результатов приведены распределение линий тока в межлопаточном канале и потерь по высоте лопатки для исходного и оптимального вариантов (рис. 6 и 7).

Из рис. 6 и 7 видно, что оптимальный вариант имеет значительно меньшее значение потерь в периферийной области решетки. Неожиданный и очень интересный результат данного исследования – возможность существенного влияния на величину пика вторичных потерь в периферийной зоне



решетки. Данное уменьшение интенсивности вторичных явлений вызвано более благоприятным безотрывным течением во входном участке.

Полученные результаты хорошо согласуются с работой [2]. Согласно данной работе поджатие потока на выходе из направляющего аппарата путем искривления периферийного обвода положительно сказывается на эффективности решетки. Однако исследуемая в работе [2] решетка имела достаточно большую кривизну обвода во входной части решетки, что сопровождалось отрывом потока и сводило на нет положительный эффект от поджатия потока на выходе. Как видно из рис. 7, оптимальный вариант сочетает в себе поджатие потока на выходе из решетки наряду с устранением вихревой структуры на входе.

На основе проведенных исследований установлено:

- оптимизация формы меридионального обвода проточной части является существенным резервом повышения эффективности проточной части турбомашин;
- предложенный алгоритм оптимизации даже по двум варьируемым параметрам и описание формы меридионального обвода проточной части с помощью кривой Безье (с использованием при поиске оптимального решения теории планирования эксперимента и ЛПт-поиска экстремума) позволили получить оптимальную форму меридионального обвода, при которой интегральные потери по сравнению с исходным вариантом уменьшены на 7,5% в относительных величинах.

Литература

1. Кириллов, И. И. Теория турбомашин / И. И. Кириллов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 536 с.
2. Топунов, А. М. Управление потоком в тепловых турбинах / А. М. Топунов, Б. А. Тихомиров. – Л.: Машиностроение, 1979. – 151 с.
3. Бойко, А. В. Применение вычислительной аэродинамики к оптимизации лопаток турбомашин / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, М. В. Бурлака. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – 192 с.
4. Бойко, А. В. Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента / А. В. Бойко, А. П. Усатый, В. С. Баранник // Вестн. НТУ «ХПИ». Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование. – 2013. – № 12 (986). – С. 5–9.

Поступила в редакцию 01.10.15

¹ А. А. Карпик

² В. А. Яковлев, канд. техн. наук

² Ю. С. Воробьев, д-р техн. наук

¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
e-mail: karpikann@gmail.com

² Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
г. Харьков,
e-mail: yava@ipmach.kharkov.ua;
vorobiev@ipmach.kharkov.ua

Ключові слова: осьовий компресор, лопатковий апарат, решітка профілів, в'язкий потік, чисельне моделювання, нестационарність.

УДК 533.6

АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В РЕШЕТКАХ ПРОФИЛЕЙ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Виконано чисельне дослідження тривимірної в'язкої течії в решітках осьового компресора низького тиску на основі системи нестационарних рівнянь Нав'є–Стокса, осереднених за Рейнольдсом. Проведено розрахунок в нестационарній тривимірній постановці за допомогою програмного комплексу F. Визначено несприятливі області течії газу в міжлопатковому каналі та причини нерівномірності розподілення швидкості та тиску.

Введение

Особенностью течения в решетках турбомашин и компрессоров является силовое взаимодействие между движущимся потоком и упругими элементами – лопатками. Существенное влияние на структуру потока оказывает нестационарное аэродинамическое взаимодействие движущихся решеток. При относительном перемещении лопаточных венцов в межлопаточных каналах происходит

© А. А. Карпик, В. А. Яковлев, Ю. С. Воробьев, 2015