

УДК 621.165

В.П. СУББОТОВИЧ

*Национальный технический университет «ХПИ», Украина*

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

*Рассмотрены результаты проектирования рабочей лопатки для части высокого давления мощных паровых турбин на основе новых методов решения прямой и обратной задач расчета Q3D-течения в решетках турбин, специально разработанных для оптимального проектирования. В этих методах общая задача расчета течения в слое переменной толщины представлена как ограниченное множество не связанных между собой относительно простых отдельных задач расчета течения в выбранных пересечениях этого слоя, что обеспечивает возможность параллельного решения отдельных задач. Эти отдельные задачи решаются методами нелинейного программирования. Предложена методика оптимального проектирования решеток профилей с большим углом поворота потока. Спроектирована новая рабочая решетка, профиль которой имеет волнообразные контуры, а коэффициент вторичных потерь решетки значительно ниже, чем у решетки стандартных профилей.*

**Ключевые слова:** турбина, рабочая лопатка, решетка профилей, межлопаточный канал, прямая, гибридная и обратная задачи.

### Введение

КПД паровых и газовых турбин во многом определяется газодинамической эффективностью их проточных частей, важнейшими элементами которых являются направляющие и рабочие решетки. Основным резервом повышения их КПД есть оптимизация профилей сопловых и рабочих лопаток. Решение этих проблем обуславливает необходимость пересмотра подходов к самому процессу проектирования сопловых и рабочих решеток, необходимость применения новых методов расчета течения.

Аэродинамические задачи подразделяются на прямые, гибридные и обратные. Обратная задача заключается в построении турбинной решетки с такой геометрией, которая реализует заданные характеристики течения в межлопаточных каналах. В мировой практике проектирования лопаток обратная задача используется очень редко, поскольку до окончания ее решения ничего нельзя сказать о профилях лопатки. Одним из главных моментов является необходимость нахождения минимума аэродинамических потерь в решетке при условии, что к проектируемой лопатке предъявляются требования, которые вытекают из обеспечения прочности и особенностей технологического процесса ее изготовления.

В данной работе при проектировании решетки профилей использовались новые методы решения прямой, гибридной и обратной задачи для расчета течения в межлопаточных каналах. Эти методы

обеспечивают выполнение требований, вытекающих из особенностей организации вычислительного процесса при решении задач оптимального проектирования, а именно: проводить параллельные вычислительные процессы, исключить итерационные процессы, которые не сходятся, не хранить существенные объемы информации [1-5].

### Результаты решения прямой задачи

Расчет течения был выполнен для рабочей решетки с неизменным по высоте стандартным профилем P2 [6]. Основные геометрические характеристики решетки: хорда профиля – 102,83 мм; осевая ширина решетки – 99,66 мм; высота рабочей части лопаток – 83 мм, веерность – 1/17.

Прямая задача была решена на цилиндрической поверхности тока на среднем диаметре решетки, для которого шаг решетки – 66,654 мм, угол входа потока в решетку – 36,24°, число Маха на выходе из решетки – 0,55. Расчет потерь в решетке был выполнен на основе расчета пограничного слоя интегральными методами [7]. Расчет потока в решетке так же был проведен с помощью CFD-программы. Коэффициенты профильных потерь равны 3,72% и 3,60%, соответственно, что хорошо согласуется со значением коэффициента профильных потерь, известным из отраслевого стандарта [6].

В результате решения прямой задачи определены граничные условия обратной задачи, а именно: координаты линии тока, соответствующей половине

расхода через слой, и их производные в осевом направлении до второго порядка включительно, а так же распределение скорости вдоль этой линии тока и производные скорости до второго порядка включительно.

### Методика проектирования межлопаточного канала

Для определения границ межлопаточного канала и параметров течения в нем используется метод решения обратной задачи. На основе этого метода разработана методика оптимального проектирования решеток профилей с большим углом поворота потока.

В процессе оптимизационного поиска не изменяются:

- 1) массовый расход через слой в межлопаточном канале;
- 2) параметры рабочего тела в сечении перед решеткой: полное давление и удельный объем;
- 3) толщина слоя;
- 4) двенадцать граничных условий для функции, задающей геометрию средней линии тока межлопаточного канала: координата линии тока, полные первая и вторая производные в осевом направлении в четырех точках А, В, С, D; точка А – точка в сечении перед решеткой, В – точка в горле на входе в канал, С – точка в горле на выходе из канала, D – точка в сечении за решеткой;

5) двенадцать граничных условий для скорости потока в четырех точках А, В, С, D: величина скорости, полные первая и вторая производные скорости в осевом направлении.

Задание условий 4) и 5) позволяет нам сохранить координаты и размеры входного и выходного горловых сечений межлопаточного канала, а также сохранить координаты и толщины входной и выходной кромок профиля.

В качестве независимых переменных задачи оптимизации выбраны вещественные коэффициенты шести функций, задающих геометрию средней линии тока и распределение скорости потока в осевом направлении на участках АВ, ВС, CD.

Задача оптимального проектирования решетки профилей рассматривается как задача оптимизации при наличии ограничений. Целевая функция – коэффициент вторичных потерь решетки. Система ограничений включает в себя ограничения-неравенства, определяющие допустимые прочностные характеристики профиля, и одно ограничение-равенство, задающее величину коэффициента профильных потерь решетки.

### Результаты проектирования решетки профилей

В результате оптимального проектирования создан новый профиль, который показан на рис. 1. Благодаря выполнению граничных условий, получена новая решетка профилей, которая имеет основные характеристики (шаг, толщина входной и выходной кромки, осевая ширина лопатки, угол установки и хорда профиля) такие, как и у решетки профилей P2. Углы выхода потока у этих решеток одинаковы на режиме проектирования.

Средняя линия тока в межлопаточных каналах решетки новых профилей (см. рисунок) заметно отличается от средней линии тока в межлопаточных каналах решетки профилей P2: в канале решетки профилей P2 поворот потока осуществляется постоянно, от точки А до точки D, а в каналах новой решетки поворот потока выполняется практически только дважды и, примерно, на одинаковые углы.

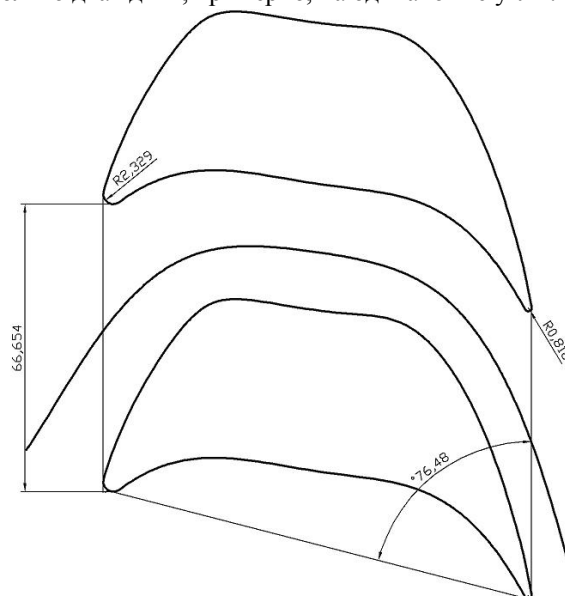


Рис. Решетка новых профилей

Отметим, что межлопаточный канал решетки новых профилей имеет волнообразную форму. Однако при такой форме межлопаточного канала средняя линия тока на всех участках канала не меняет кривизну.

Основным отличием распределения скорости потока вдоль средней линии тока от исходного является то, что не имеет места торможение потока во входной части межлопаточного канала.

По сравнению с решеткой профилей P2 снижение коэффициента суммарных потерь для решетки новых профилей составило 0,65%. При этом существенно, на 0,6%, снизился коэффициент вторичных потерь, а коэффициент профильных потерь, величина которого задавалась, находится в пределах допуска, принятого при решении задачи условной оп-

тимизации:  $(0,035 \pm 0,0005) \times 100\%$ .

Существенное уменьшение коэффициента вторичных потерь в решетке новых профилей объясняется двумя основными факторами: уменьшением длины траектории движения рабочего тела и, естественно, потерей от трения о торцевые границы канала, а также значительным снижением градиента статического давления в срединной части канала.

Поиск оптимальных вариантов формы средней линии и распределения скорости потока вдоль нее проводился с учетом ограничений-неравенств на величину площади профиля и локальную минимально допустимую толщину профиля. В данном оптимизационном исследовании ориентировались на эти характеристики профиля P2. В результате площадь нового профиля равна 3016,17 мм<sup>2</sup> по сравнению с площадью исходного профиля P2, равной 2891,21 мм<sup>2</sup>, что на 124,96 мм<sup>2</sup> больше, чем площадь исходного профиля. Оценивались также моменты инерции и сопротивления, определяющие прочностные характеристики решетки. Основные прочностные характеристики нового профиля мало отличаются от соответствующих значений моментов исходного варианта P2 и практически все отличия в прочностных характеристиках нового профиля в лучшую сторону.

Для проверки эффективности вариантов решетки профилей P2 и решетки новых профилей при различных углах входа и числах Маха, были проведены численные эксперименты с помощью CFD-программы. Для двухмерного вязкого течения через решетки профилей оценивались коэффициенты профильных потерь в решетках и поля параметров в межлопаточных каналах. Расчетная сетка и используемая модель турбулентности обоих вариантов решеток профилей были одинаковыми.

При числах Маха 0,55, 0,7 и 0,82 на выходе из решетки, если угол входа потока в решетку меньше 32°, коэффициент профильных потерь у решетки новых профилей больше, чем у решетки профилей P2. Если угол натекания меняется от 32° до 36°, то коэффициенты профильных потерь у обеих решеток практически одинаковы. А если угол натекания больше 36° градусов, то коэффициент профильных потерь у решетки новых профилей меньше. Отметим, что качественно отличается у решеток и темп роста коэффициентов профильных потерь в сторону меньших углов натекания и в сторону больших углов натекания, а именно: для решетки новых профилей увеличение коэффициента профильных потерь с ростом угла входа потока существенно слабее.

Выполнена оценка коэффициента профильных потерь рабочей решетки с лопатками постоянного по высоте профиля первой ступени ЦВД турбины К-220-44 ОАО «ТУРБОАТОМ» при использовании

профиля P2 и его замене на новый профиль. Для этого проведен расчет обтекания решеток профилей при углах входа потока 30° и 46°, относительных шагах 0,63 и 0,68, числах Маха 0,52 и 0,58, соответствующих корневому и периферийному сечениям рабочей решетки.

В корневом сечении коэффициент профильных потерь рабочей решетки с новым профилем на 0,106% больше, чем у рабочей решетки с профилем P2, а в периферийном сечении коэффициент профильных потерь у решетки с новым профилем на 0,812% меньше. Так как угол входа потока и относительный шаг решетки в корневом и периферийном сечениях не сильно изменяется по сравнению с углом входа потока и шагом решетки на среднем диаметре, то величина коэффициента вторичных потерь сохраняется и, соответственно, у решетки лопаток с профилем P2 он равен 2,87%, а у решетки лопаток с новым профилем – 2,27%. Основываясь на приведенных значениях коэффициентов потерь сравниваемых рабочих решеток, отметим, что коэффициент суммарных потерь решетки лопаток с новым профилем на 0,80% ниже, чем коэффициент суммарных потерь решетки лопаток с профилем P2.

## Заключение

Новые методы решения прямой, гибридной и обратной задач позволяют проектировать межлопаточные каналы и профили турбинных решеток с большими углами поворота потока при наличии различных геометрических ограничений.

Разработана методика оптимального проектирования межлопаточных каналов решеток турбомашин на основе решения обратных задач. Задача оптимального проектирования – задача условной оптимизации, система ограничений которой включает в себя как ограничения-неравенства, определяющие прочностные характеристики лопаток, так и ограничение-равенство, задающее величину коэффициента профильных потерь проектируемой решетки. Целевая функция задачи оптимизации – коэффициент вторичных потерь решетки.

Решена задача оптимизации рабочей решетки турбины с лопатками постоянного по высоте профиля при ограничениях на локальные минимальные толщины профиля, минимальную площадь профиля и моменты сопротивления при заданном уровне коэффициента профильных потерь. Спроектирован профиль рабочей лопатки, который имеет волнообразные очертания корытца и спинки. По сравнению с исходной рабочей решеткой коэффициент суммарных потерь новой решетки ниже на 0,8%.

Профиль рабочей лопатки, спроектированный с волнообразными корытцем и спинкой, может не только обеспечить более низкие вторичные потери

решетки по сравнению со стандартным профилем P2, но и ее удовлетворительную работу в широком диапазоне углов атаки.

### Литература

1. Субботович, В.П. Задача расчета скорости на поверхности лопатки турбомашин как задача оптимизации [Текст] / В.П. Субботович, А.Ю. Юдин // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2004. – № 12. – С. 101–106.

2. Субботович, В.П. Постановка и метод решения гибридных задач расчета течения в решетках турбомашин [Текст] / В.П. Субботович, А.Ю. Юдин // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2005. – № 6. – С. 44–48.

3. Субботович, В.П. Постановка и метод решения обратной задачи для определения формы межлопаточных каналов кольцевых решеток турбомашин [Текст] / В.П. Субботович, А.Ю. Юдин // Вестник Национального технического университе-

та "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2005. – № 29. – С. 49–56.

4. Субботович, В.П. Обтекание трехмерным потоком решетки профилей турбомашин на поверхности вращения [Текст] / В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, Ф.К. Там // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2008. – № 6. – С. 41–46.

5. Субботович, В.П. Обратная задача теории решеток на осесимметричной поверхности тока [Текст] / В.П. Субботович, А.Ю. Юдин, Ф.К. Там // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2009. – № 3. – С. 56–61.

6. ОСТ 108.260.02–84. Профили рабочих лопаток постоянного сечения паровых стационарных турбин. Типы, основные параметры и размеры [Текст]. – НПО ЦКТИ. – 1985. – 30 с.

7. Гречаниченко, Ю.В. Вторичные течения в решетках турбомашин [Текст] / Ю.В. Гречаниченко, В.А. Нестеренко. – Х.: Вища школа, 1983. – 120 с.

Поступила в редакцию 25.01.2013, рассмотрена на редколлегии 30.01.2013

**Рецензент:** член-корр. НАН Украины, д-р техн. наук, проф., зав. отделом оптимизации процессов и конструкций турбомашин А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

## ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК НА ОСНОВІ ЗВОРотної ЗАДАЧІ

*В.П. Субботович*

Розглянуто результати проектування робочої лопатки для частини високого тиску потужних парових турбін на основі нових методів розв'язування прямої та зворотної задач розрахунку Q3D-течі в решітках турбін, спеціально розроблених для оптимального проектування. У цих методах загальна задача розрахунку течії в шарі змінної товщини представлена як обмежена множина не зв'язаних між собою щодо простих окремих задач розрахунку течії у вибраних перетинах цього шару, що забезпечує можливість паралельного розв'язування окремих задач. Ці окремі задачі розв'язуються методами нелінійного програмування. Запропоновано методику оптимального проектування решіток профілів з великим кутом повороту потоку. Спроектовано нову робочу решітку, профіль якої має хвиляподібні контури, а коефіцієнт вторинних втрат решітки значно нижче, ніж у решітці стандартних профілів.

**Ключові слова:** турбіна, робоча лопатка, решітка профілів, міжлопатковий канал, пряма, гібридна та зворотна задачі.

## OPTIMAL DESIGN OF ROTOR BLADES VIA INVERSE PROBLEM

*V.P. Subotovich*

The design of rotor blades for high pressure steam turbines was considered. The new methods for the solution of direct, hybrid and inverse problems of Q3D-flow through turbine cascades in a layer of variable thickness were developed. In the developed methods direct, hybrid and inverse problems are divided into separate sub-problems. They can be solved in any sequence or at the same moment, which provides the possibility to control designed blade's separate zones regarding its strength and possibility and allows decreasing the design time greatly. Separate sub-problems are solved by methods of non-linear programming, which do not demand saving of large amount of information. The technology of optimal design for blade cascade with big angle of flow swirl is developed. The rotor cascade of power high pressure steam turbine is designed, profiles of which have pressure side and suction side with local wavy contours and the coefficient of second losses is much lower than atlas cascades' profiles have.

**Keywords:** turbine, rotor blade, profile cascade, blade channel, direct, hybrid and inverse problems.

**Субботович Валерій Петрович** – канд. техн. наук, с.н.с., профессор кафедри турбиностроєння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: alex78ua@yahoo.com