

УДК 621.165

В.П. СУББОТОВИЧ, канд. техн. наук, А.Ю. ЮДИН, канд. техн. наук,  
ФАН КОНГ ТАМ

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ РЕШЕТОК ТУРБОМАШИН**

Наведені результати проектування соплових решіток профілів турбіни за допомогою розробленого авторами методу розв'язування двомірної оберненої задачі теорії решіток. Решітка профілів Н4 вибрана як прототип. Спроектовано шість соплових решіток при трьох варіантах геометричних характеристик середніх ліній течії у міжлопаткових каналах і двох варіантах розподілів швидкості потоку уздовж них.

The results of designing of turbine nozzle profile cascades with the help of the method of solution of two-dimensional inverse problem developed by authors are presented. The cascade of the profiles H4 was chosen as prototype. Six nozzle cascades at three variants of geometrical characteristics of mid stream lines between two neighboring profiles and two variants of velocity distribution along these stream lines are designed.

Решение обратной задачи в трехмерной постановке, результаты которого могли бы непосредственно использоваться в практике проектирования, представляется на сегодняшний день нереальным. В инженерной практике не получили развития даже методы решения плоской обратной задачи, наиболее известными из которых являются методы построения решетки профилей по годографу скорости и конформных отображениях. Эти методы не позволяют проектировщикам проверить прочностные ограничения, пока решение не представлено на плоскости, что создало общее мнение об ограниченности их применения. Тем не менее, решение обратной задачи в двухмерной постановке обладает большими перспективами, потому что позволяет получать лопатки турбин с высоким аэродинамическим качеством при значительном сокращении времени, затрачиваемого на проектирование и доводку [1].

Рассмотрим результаты проектирования сопловых решеток профилей турбины с помощью нового метода решения двухмерной обратной задачи теории решеток [2]. Данный метод позволяет проектировщику по известным полным параметрам рабочего тела на входе в межлопаточные каналы, массовому расходу, геометрии одной из линий тока внутри канала и распределению скорости вдоль нее спроектировать межлопаточный канал и, как конечный результат, решить задачу профилирования.

В качестве прототипа выбрана решетка профилей Н4 (ТС-1А). Шесть сопловых решеток 1а, 1б; 2а, 2б; 3а, 3б получены при трех вариантах геометрии средней линии тока в межлопаточных каналах (1, 2 и 3) и двух вариантах (а и б) распределений скорости потока вдоль этой линии тока (рис. 1-4). Варианты 1, 2 и 3 средней линии тока отличаются на участке АВ геометрией (АВ – участок линии тока от входа в межлопаточный канал до горлового сечения), выбранной для обеспечения углов входа потока в решетку, равных 105°, 90° и 75° соответственно. Для определения параметров потока в канале сопловой решетки профилей Н4, геометрии средней линии тока и распределения скорости вдоль нее была решена прямая задача с помощью разработанного авторами статьи метода [3, 4]. Отметим, что при проектировании решеток 2а и 2б (рис. 3) средняя линия тока на участке АВ была выбрана такой же, как и у решетки профилей Н4. На выходе канала, за горловым сечением, геометрия средней линии тока и распределение скорости вдоль нее одинаковы для всех вариантов новых решеток профилей и для решетки профилей Н4.

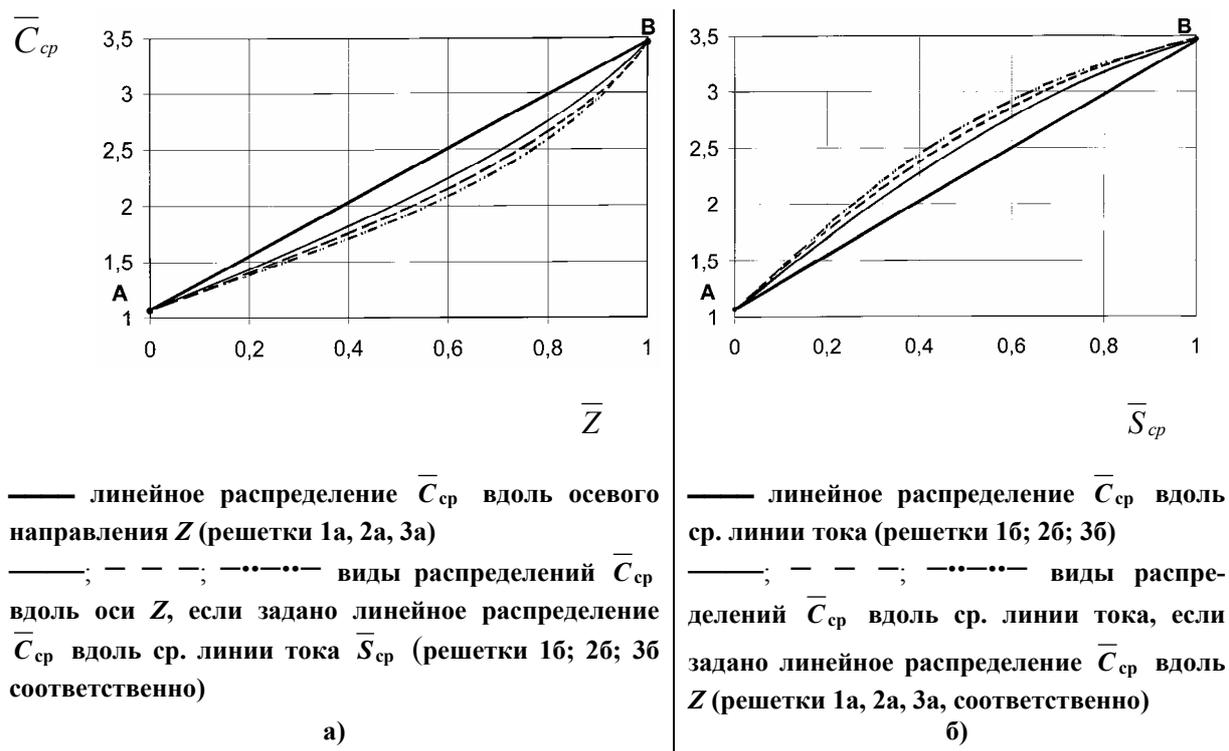


Рис. 1. Распределение безразмерной скорости  $\bar{C}_{cp}$ , вдоль средних линий тока  $\bar{S}_{cp}$  и вдоль осевого направления  $Z$  решеток 1а,б; 2а,б; 3а,б

Обозначения на рис. 1:  $\bar{C}_{cp} = C_{cp}/C_0$  – безразмерная скорость, где  $C_{cp}$  – текущее значение скорости потока на средней линии тока, а  $C_0$  – скорость потока на входе в сопловую решетку;  $\bar{Z} = Z_i/Z_{AB}$  – относительная длина проекции средней линии тока на осевое направление  $Z$  на участке АВ,  $Z_i$  – текущее значение,  $Z_{AB}$  – длина проекции средней линии тока на осевое направление  $Z$ ;  $\bar{S}_{cp} = S_i/S_{AB}$  – относительная длина средней линии тока на участке АВ,  $S_i$  – текущее значение,  $S_{AB}$  – длина средней линии тока на участке АВ.

Расслоение тонких линий (сплошная линия, пунктирная линия, пунктирная линия с двумя точками) при переходе от координатной оси  $\bar{Z}$  к координатной оси  $\bar{S}_{cp}$  и, наоборот, при переходе от координатной оси  $\bar{S}_{cp}$  к координатной оси  $\bar{Z}$  связано с различной длиной и формой средних линий тока вариантов 1, 2, 3.

Решетки профилей и распределения безразмерных скоростей  $\bar{C}$  вдоль их обводов, которые показаны толстыми линиями на рис. 2а, 3а, 4а, соответствуют линейному распределению скорости вдоль осевой координаты  $Z$  на участке АВ.

Решетки профилей и распределения безразмерных скоростей  $\bar{C}$  вдоль их обводов, которые показаны тонкими линиями на рис. 2б, 3б, 4б, получены при линейном распределении скорости потока вдоль средней линии тока  $\bar{S}_{cp}$  на участке АВ. В работе [5] разработан критериальный метод оценки газодинамической эффективности течения в межлопаточном канале, основанный на анализе структуры потока на различных участках канала. Одним из критериев метода является критерий «оптимальности разгона потока», который позволяет количественно оценить профильные потери решетки на основе сравнения относительного отклонения

существующего изменения скорости потока в межлопаточном канале на десяти линиях тока от оптимального изменения. В качестве оптимального принимается равномерный разгон потока: скорость вдоль линии тока растет по линейному закону. По мнению автора [5] использование именно такого распределения скорости потока вдоль средней линии тока представляется перспективным в качестве дополнительного условия для решения обратной задачи теории решеток. Это предложение основывается на анализе структуры потока в межлопаточных каналах решеток «Атласа экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин» ЦИАМ.

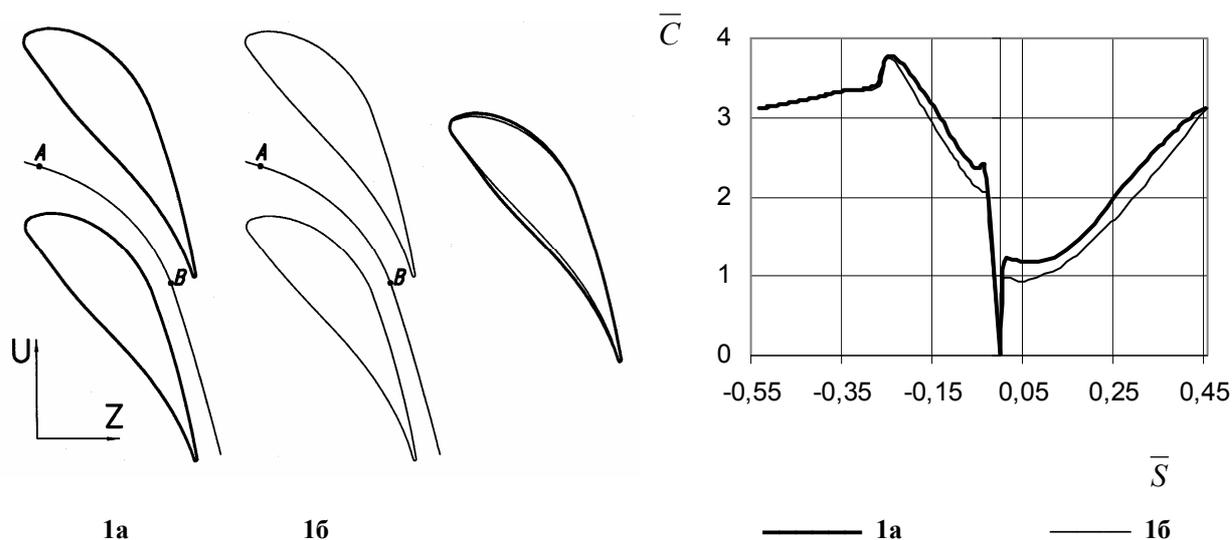


Рис. 2. Решетки 1а, 1б и распределения скоростей вдоль обводов их профилей

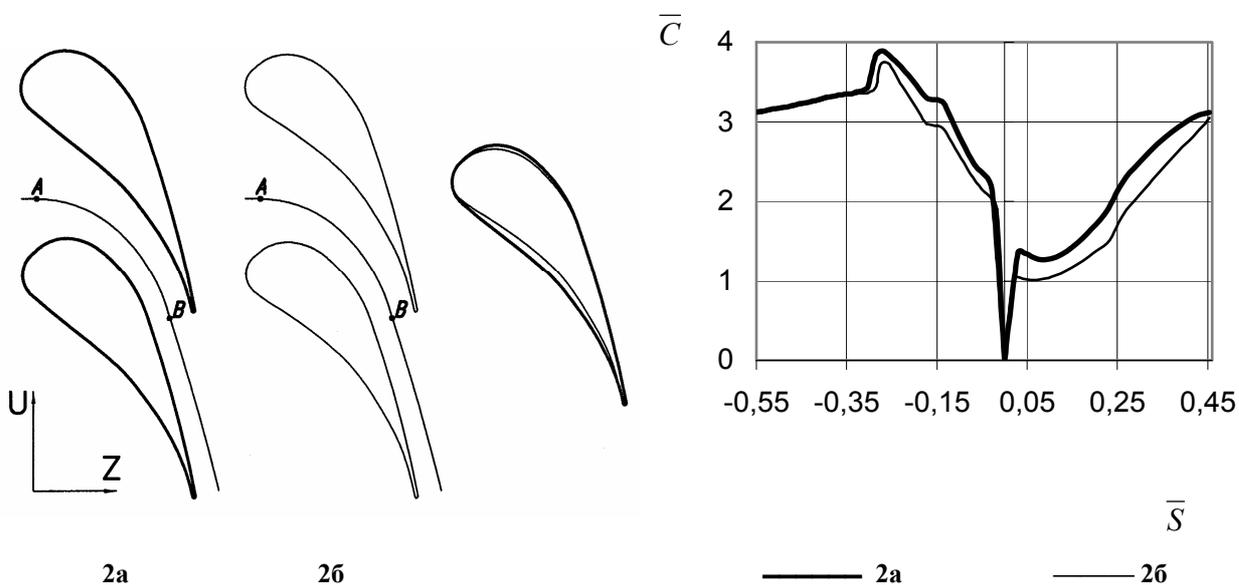


Рис. 3. Решетки 2а, 2б и распределения скоростей вдоль обводов их профилей

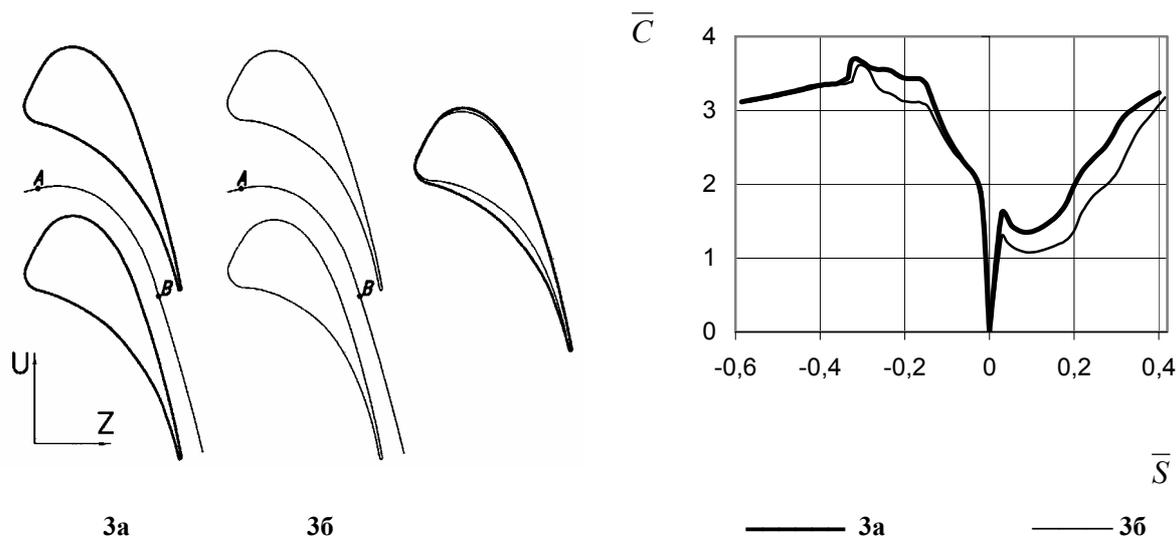


Рис. 4. Решетки 3а, 3б и распределения скоростей вдоль обводов их профилей

Следует заметить, что все решетки профилей 1а, 2а и 3а, спроектированные при линейном распределении скорости потока вдоль осевого направления Z на участке АВ, имеют профили с большими толщинами и, соответственно, с большими площадями, чем решетки 1б, 2б и 3б, спроектированные в соответствии с дополнительным условием решения обратной задачи теории решеток, предложенным в работе [5]. А коэффициенты профильных потерь, определенные по методике Лойцянского Л. Г., для решеток профилей 1б, 2б и 3б несколько ниже.

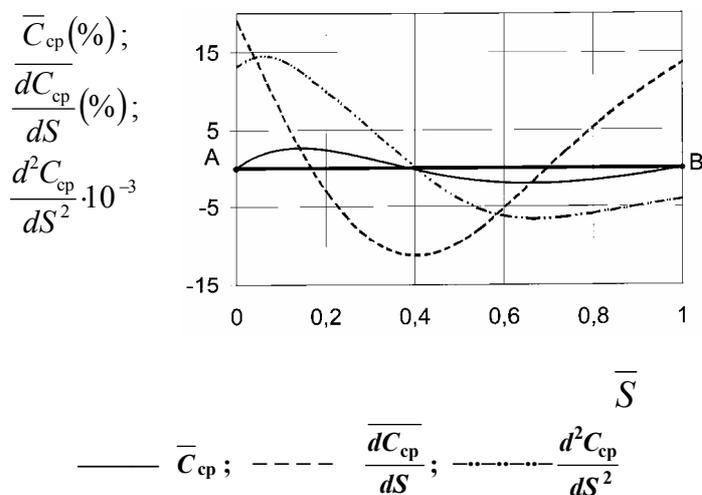


Рис. 5. Распределение скорости и ее производных вдоль средней линии тока решетки профилей Н4

При проектировании решетки 2б (рис. 3) средняя линия тока была выбрана такой же, как и у решетки профилей Н4 (ТС-1А). При этом характер распределения скорости потока вдоль средней линии тока внутри межлопаточных каналов решетки профилей Н4 отличается от линейного. На рис. 5 эти отличия представлены как относительное отклонение линейного распределения скорости потока от распределения скорости вдоль средней линии тока решетки профилей Н4

$$\bar{C}_{cp} = \frac{C_{2б} - C_{ТС-1А}}{C_{2б}} \cdot 100\%$$

и распределение относительного отклонения первой производной скорости потока  $\frac{d\bar{C}_{cp}}{dS}$

и абсолютного значения второй производной скорости потока  $\frac{d^2\bar{C}_{cp}}{dS^2}$  вдоль средней линии тока в межлопаточном канале решетки профилей Н4 (для решетки профилей 2б на участке АВ первая производная скорости потока равна константе (рис. 1б), а вторая

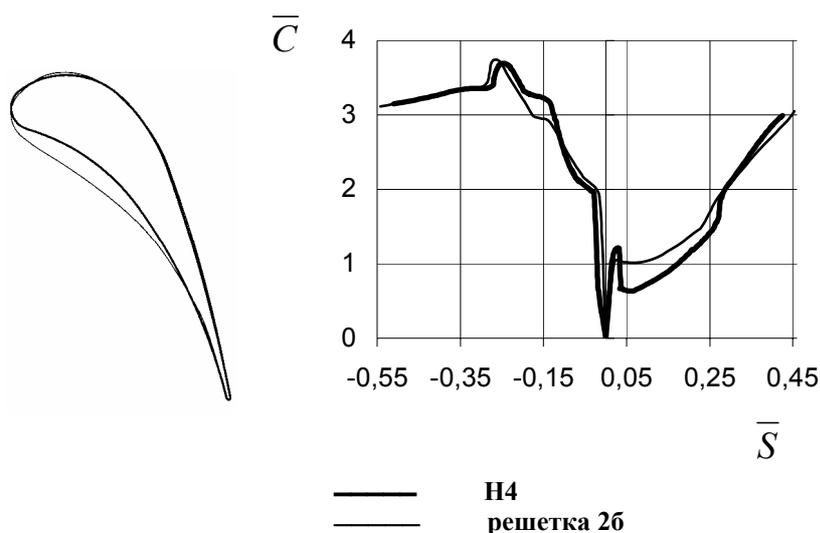


Рис. 6. Варианты решеток 26 и Н4

производная равна нулю). Из рис. 5 видно, что даже небольшое отличие характера распределения скорости от линейного приводит к существенному отличию первых и вторых производных скорости, что заметно влияет на форму профилей и, соответственно, на распределение скоростей потока вдоль обводов профилей. Профили решеток Н4 и 26, а также распределения скоростей

вдоль их обводов показаны на рис. 6. Следует отметить, что коэффициенты профильных потерь этих решеток, рассчитанные по методике Лойцянского Л. Г., практически одинаковы.

Итак, с помощью нового метода решения обратной задачи теории решеток [2] были спроектированы шесть сопловых решеток турбинных профилей, имеющие прочностные характеристики, не уступающие профилям решетки Н4, и низкие расчетные коэффициенты профильных потерь. Сама постановка обратной задачи обеспечивает выполнение большого количества ограничений на конструкцию решетки профилей. Поэтому при решении задачи оптимального проектирования решетки на основе этого метода могут быть как неизменными, так и варьироваться и шаг решетки, и ее осевая ширина, и хорда профиля.

#### Литература

1. Van den Braembussche R. A. Turbomachinery component design by means of CFD // Task Quarterly Journal. – 2002. – Vol. 6. – No 1. – p. 39–61.
2. Субботович В. П., Юдин А. Ю. Постановка и метод решения обратной задачи для определения формы межлопаточных каналов кольцевых решеток турбомашин // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – № 29. – с. 49–56.
3. Субботович В. П., Юдин А. Ю. Расчет двумерного течения в межлопаточных каналах сопловых и рабочих решеток турбин // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2006. – № 5. – с. 43–46.
4. Субботович В. П., Юдин А. Ю. Задача расчета скорости на поверхности лопатки турбомашин как задача оптимизации // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – № 12. – с. 101–106.
5. Мухина С. Д. Разработка критериального метода расчета профильных потерь в турбинных решетках: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.07.05/ Рыбинская авиационная технологическая академия им. П. А. Соловьева. – Рыбинск, 2006. – 16 с.