

УДК 621.165

В. П. СУББОТОВИЧ, Ю. А. ЮДИН, А. Ю. ЮДИН, С. А. ТЕМЧЕНКО

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕКольцевых ДИФфузоров ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА ВХОДЕ

Проведено расчетное исследование влияния угла входной закрутки потока на потери и течение в спроектированном авторами статьи оптимальном осекольцевом диффузоре с криволинейными образующими и в двух осекольцевых конических диффузорах с прямолинейными образующими. Диффузоры имеют одинаковые отношение среднего диаметра к высоте канала на входе и значение степени расширения. Угол закрутки потока на входе у всех диффузоров изменялся в диапазоне от 0 до 40 градусов. Показано, что у оптимального диффузора темп роста коэффициента полных потерь ниже во всем исследованном диапазоне углов закрутки на входе, чем у диффузоров с прямолинейными образующими.

Ключевые слова: турбомашинa, осесимметричное течение, кольцевой диффузор, прямая и обратная аэродинамические задачи, угол закрутки потока.

Введение

Для различных технических устройств турбомашин, таких как переходные каналы турбореактивных двигателей, выхлопные патрубки, элементы камер сгорания и системы подвода рабочего тела к первым ступеням, актуальной проблемой является проектирование высокоэкономичных осевых кольцевых диффузорных каналов с учетом изменения параметров потока на входе в широком диапазоне.

На нерасчетных режимах работы за последней ступенью турбины течение может существенно отличаться от осевого направления. Появление окружной составляющей скорости, и, соответственно, угла закрутки потока, влияет на аэродинамические характеристики выходных диффузоров. Характер этого влияния зависит от конструктивных особенностей диффузоров. До определенных значений окружная составляющая скорости может благоприятно влиять на аэродинамические характеристики диффузоров некоторых типов. Например, аэродинамические характеристики широкоугольных конических диффузоров (без втулки) улучшаются при небольших значениях закрутки потока на входе и слабо изменяются у кольцевых диффузоров. Положительное влияние закрутки потока на экономичность широкоугольных конических диффузоров, связано с тем, что развитие течения в зоне положительных градиентов давления происходит в поле центробежных сил, препятствующих возникновению отрыва потока от наружной стенки диффузора. Если для широкоугольных конических диффузоров это поле препятствует возникновению отрыва потока от стенок канала, то у кольцевых диффузоров, одновре-

менно со стабилизацией течения на внешней образующей происходит ухудшение условий течения на внутренней образующей [1, 2]. В результате в кольцевых конических диффузорах с увеличением закрутки потока темп изменения коэффициента полных потерь небольшой и только после некоторого значения закрутки наблюдается существенный рост потерь, что определяется формой образующих [3].

Уменьшение потерь в осекольцевых диффузорах, как при осевом входе потока, так и при наличии закрутки потока является актуальной задачей.

Постановка задачи

На основе разработанного авторами статьи метода, который позволяет на единой методологической основе решать как прямую, так и обратную аэродинамические задачи для осесимметричного течения [4, 5] разработан алгоритм для оптимального проектирования кольцевых диффузорных каналов [6], учитывающий ограничения на осевые размеры и степень расширения. На базе этого алгоритма был спроектирован осекольцевой диффузор с криволинейными образующими [6]. Диффузор, несмотря на относительно короткую длину $l=0,5$ м для степени расширения 2, при осевом входе не имеет отрыва потока и при угле закрутки потока 40° коэффициент полных потерь ниже, чем в безотрывном диффузоре с минимальным осевым размером при той же степени расширения и прямолинейными обводами. В данной работе представлены результаты сравнительного расчетного исследования с помощью CFD программы трех вариантов осекольцевых диффузоров. Исследовалось влияние углов закрутки потока

на характер течения и коэффициенты полных потерь. Проведенное расчетное исследование влияния модели турбулентности на характер течения в диффузорах такого типа показало, что удовлетворительное соответствие экспериментальным данным получено при использовании модели турбулентности Spalart – Allmaras (SA) [7].

Результаты численного исследования

Исследованы диффузоры с одинаковой степенью расширения $n = 2$: спроектированный оптимальный осекольцевой диффузор $l=0,5$ м и два осекольцевых конических диффузора с параметрами $\alpha=35,7$; $l=0,5$ м и $\alpha=27,5$; $l=0,65$ м. Угол закрутки потока на входе в диффузор изменялся в диапазоне от 0° до 40° с шагом 10° .

Увеличение угла закрутки потока $\Delta\alpha$ на входе в оптимальный диффузор от 0° до 10° не повлияло на безотрывной характер течения, но привело к некоторому изменению распределения скоростей вблизи наружного обвода и небольшому увеличению ($\sim 2\%$) коэффициента полных потерь (рис. 1 а).

При входной закрутке потока 20° на внешнем обводе внутри диффузора появилась небольшая локальная зона с «пузырчатым» отрывом (рис. 1 б) и присоединением потока к стенке вблизи выходного сечения. Коэффициент полных потерь увеличился \sim на 40 % (рис. 2).

Дальнейшее увеличение угла закрутки потока $\Delta\alpha$ до 30° , а потом до 40° приближает локальную отрывную зону на внешнем обводе к выходному сечению диффузора (рис. 1 в, г). При этом при всех значениях углов закрутки потока $\Delta\alpha$ течение вдоль внутреннего обвода безотрывное. Увеличение коэффициента полных потерь диффузора с ростом угла $\Delta\alpha$ происходит практически линейно от значения $\zeta_{\text{п}} = 0,283$ при $\Delta\alpha = 0^\circ$ до $\zeta_{\text{п}} = 0,519$ при $\Delta\alpha = 40^\circ$ (см. рис. 2).

Кольцевой конический диффузор ($l=0,5$ м; $\alpha=35,7$; $n=2$) с такой же длиной и степенью расширения как и оптимальный при осевом входе имеет отрыв потока, как на внутреннем, так и на внешнем обводах (рис. 3). При появлении закрутки потока на входе в диффузор течение в нем изменилось.

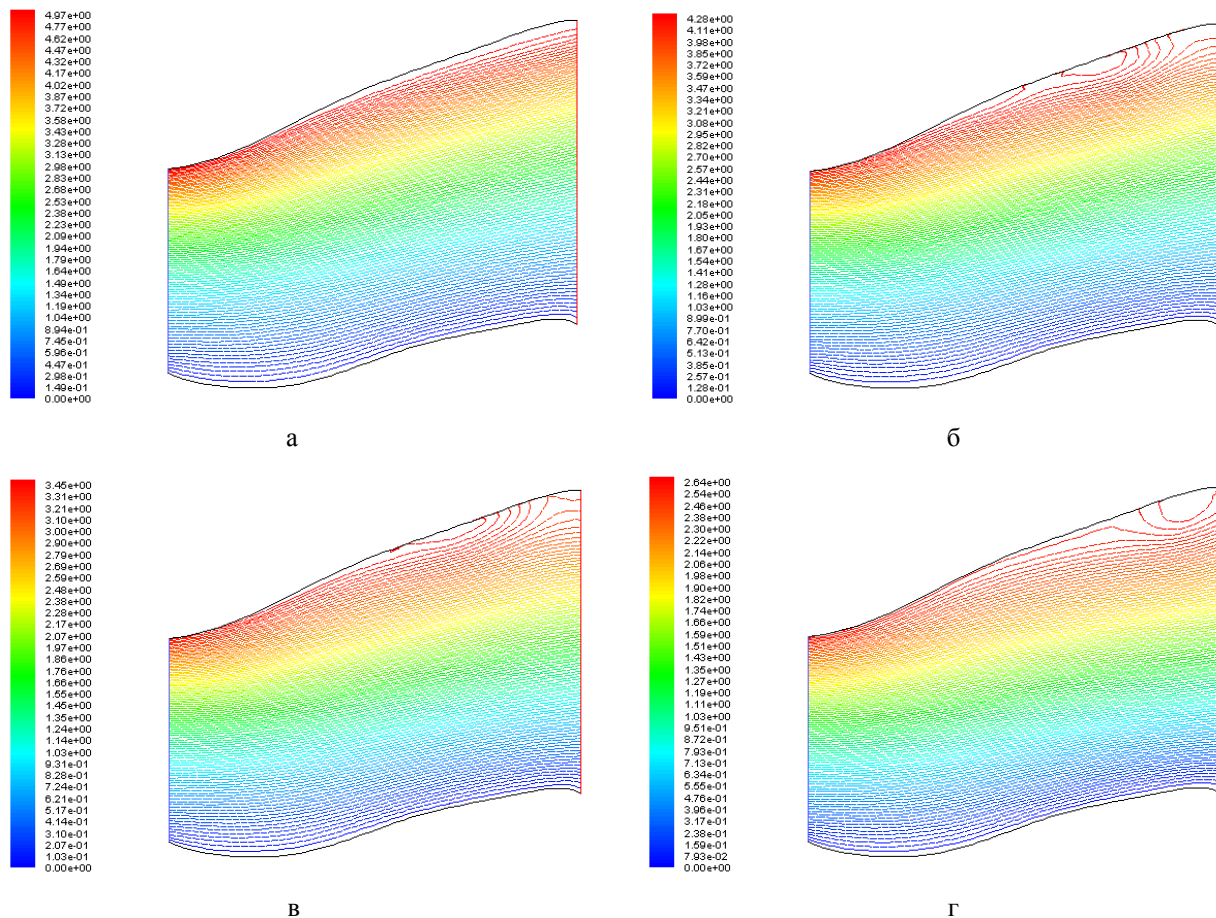


Рис. 1. Распределение линий тока внутри спроектированного оптимального осекольцевого диффузора ($l=0,5$ м; $n=2$) при углах закрутки: а – 10° , б – 20° , в – 30° , г – 40°

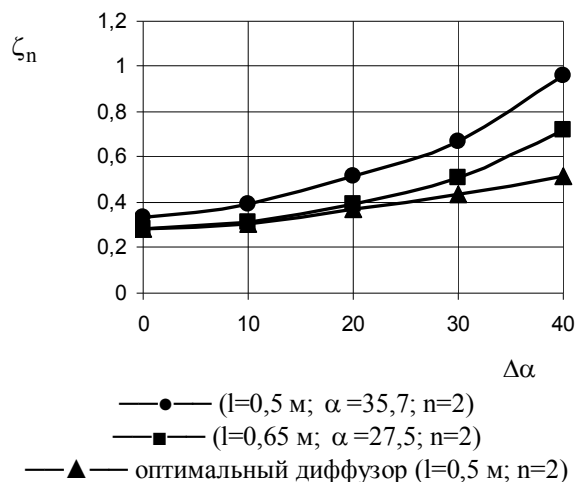


Рис. 2. Влияние закрутки потока $\Delta\alpha$ на коэффициенты полных потерь ζ_n

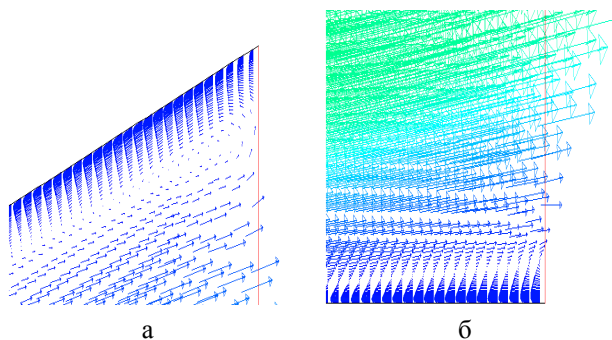


Рис. 3. Векторы скорости в периферийной зоне выходного участка диффузора $n=2$; $\alpha=35,7$; $l=0,5$ м: а – наружный обвод, б – внутренний обвод

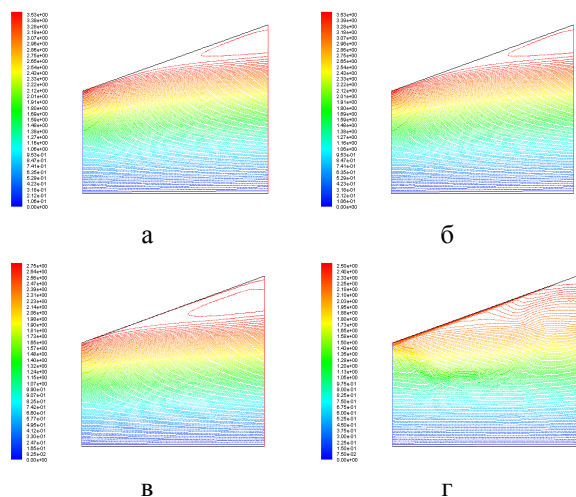


Рис. 4. Распределение линий тока внутри диффузора ($l=0,5$ м; $\alpha=35,7$; $n=2$) при углах закрутки: а – 10, б – 20, в – 30, г – 40°

Увеличилась отрывная циркуляционная зона на внешнем обводе, что привело к поджатию потока к внутреннему обводу и исчезновению отрыва на нем.

При $\Delta\alpha=10^\circ$ поток оторвался от середины наружного обвода (рис. 4 а), а при увеличении угла закрутки до 20° точка отрыва потока сместилась ближе к входному сечению (рис. 4 б).

При дальнейшем увеличении угла закрутки потока до $\Delta\alpha=30^\circ$ точка отрыва сместилась еще ближе к входному сечению диффузора (рис. 4 в). При угле $\Delta\alpha=40^\circ$ основной поток под действием центробежных сил взаимодействует с пространственной отрывной циркуляционной зоной на периферии и отрывная зона разделяется на части (рис. 4 г). Это приводит к ухудшению течения практически вдоль всего наружного обвода диффузора. При этом течение на внутреннем обводе остается безотрывным. По сравнению с оптимальным диффузором с ростом входной закрутки потока коэффициент полных потерь диффузора ($l=0,5$ м; $\alpha=35,7$; $n=2$) увеличивается в значительно большей степени. При угле $\Delta\alpha=40^\circ$ коэффициент ζ_n увеличился почти в три раза по сравнению с коэффициентом ζ_n этого диффузора при осевом входе $\Delta\alpha=0^\circ$. Коэффициент потерь ζ_n оптимального диффузора при угле закрутки $\Delta\alpha=40^\circ$ почти в два раза ниже коэффициента потерь ζ_n диффузора ($l=0,5$ м; $\alpha=35,7$; $n=2$) (см. рис. 2).

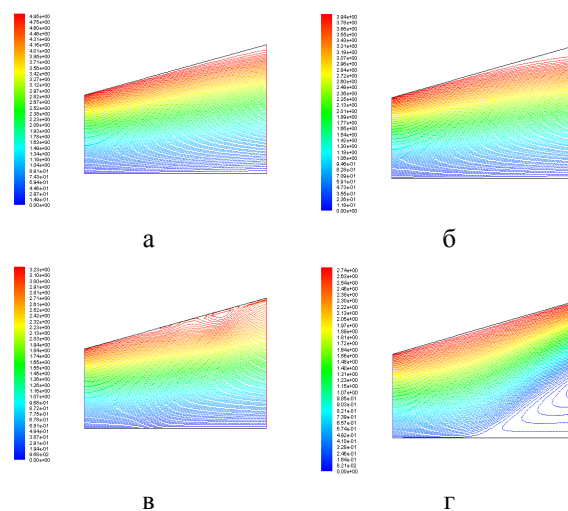


Рис. 5. Распределение линий тока внутри диффузора ($l=0,65$ м; $\alpha=27,5$; $n=2$) при углах закрутки: а – 10, б – 20, в – 30, г – 40°

На рисунке 5 представлены расчетные линии тока в диффузорном канале ($l=0,65$ м; $\alpha=27,5$; $n=2$).

Данный диффузор, как и оптимальный, при осевом входе потока имеет безотрывный характер течения. Увеличение угла закрутки потока до 10° не сопровождается отрывными течениями (рис. 5 а). Дальнейшее повышение угла $\Delta\alpha$ до 20° приводит к

обеднению расходом периферийной зоны и появлению отрыва потока от наружного обвода вблизи выходного сечения (рис. 5 б). В этом диапазоне углов $\Delta\alpha$ коэффициенты полных потерь находятся на том же уровне, как и у оптимального диффузора (см. рис. 2). При входном угле закрутки $\Delta\alpha = 30^\circ$ вблизи наружного обвода диффузора появились локальные «пузырчатые» отрывы потока (рис. 5 в). Увеличение влияния центробежных сил при угле закрутки потока $\Delta\alpha = 40^\circ$ привело к перераспределению течения во всем объеме диффузора. Отрыв потока от внутреннего обвода и развитая привтулочная циркуляционная зона уменьшила проходные сечения, основной поток поджался к периферии и стабилизировал течение на наружном обводе (рис. 5 г). Коэффициент полных потерь увеличился до значения 0,72 (см. рис. 2).

Заключение

Проведенное расчетное исследование влияния входной закрутки потока в диапазоне углов $0 \div 40^\circ$ на потери в осекольцевых диффузорах с одинаковой степенью расширения показало, что у оптимального диффузора с криволинейными образующими темп роста коэффициента полных потерь в исследованном диапазоне углов закрутки потока ниже, чем у диффузоров с прямолинейными образующими.

Наибольшая разница в коэффициентах полных потерь сравниваемых диффузоров имеет место при угле закрутки 40° . Коэффициент полных потерь оптимального диффузора при этом угле равен 0,52, что существенно меньше, чем у диффузоров с прямолинейными образующими: в 1,4 раза меньше, чем у диффузора ($l=0,65\text{ м}$; $\alpha=27,5$; $n=2$) и в 1,85 раза меньше, чем у диффузора такой же длины ($l=0,5\text{ м}$; $\alpha=35,7$; $n=2$).

Литература

1. Дыскин, Л. М. Исследование влияния закрутки потока на эффективность выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / Л. М. Дыскин, А. Е. Зарянкин, В. В. Этт // Энергомашиностроение. – 1969. – № 9. – С. 25–27.
2. Дейч, М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.
3. Левин, Е. М. Влияние закрутки потока на работу кольцевых конических диффузоров осевых турбомашин [Текст] / Е. М. Левин, Г. И. Захарчук // Энергомашиностроение. – 1972. – № 2. – С. 27–28.
4. Субботович, В. П. Обратная задача для кольцевого канала [Текст] / В. П. Субботович, С. А. Темченко // Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. праць. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Вип. 3. – X., 2010. – С. 56–60.

5. Результаты тестирования метода расчета течения в кольцевых каналах [Текст] / В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. Ю. Юдин [и др.] // Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. праць. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Вип. 8. – X., 2012. – С. 91–94.

6. Субботович, В. П. Применение обратной аэродинамической задачи для оптимизации кольцевых диффузорных каналов [Текст] / В. П. Субботович, А. Ю. Юдин, С. А. Темченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2015. – № 10 (127). – С. 77–80.

7. О результатах аэродинамических расчетов осекольцевых конических диффузоров [Текст] / В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. Ю. Юдин [и др.] // Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. праць. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Вип. 10 (1182). – X., 2016. – С. 131–135.

References

1. Dyskin, L. M., Zarjankin, A. E., Jett, V. V. Issledovanie vlijaniya zakrutki potoka na jeffektivnost' vyhlopnyh patrubkov turbomashin [Research of the Effect of Swirling Flow on the Efficiency of the Exhaust Duct of Turbomachines]. *Jenergomashinostroenie*, 1969, no. 9, pp. 25–27. (In Russian).
2. Dejch, M. E., Zarjankin, A. E. *Gazodinamika diffuzorov i vyhlopnyh patrubkov turbomashin* [The Gas Dynamics of Diffusers and Exhaust Duct of Turbomachines]. Moscow, Jenergiya Publ., 1970. 384 p. (In Russian).
3. Levin, E. M., Zaharchuk, G. I. Vlijanie zakrutki potoka na rabotu kol'cevyyh konicheskikh diffuzorov osevyh turbomashin [The Influence of Flow Swirling on the Work of the Annular Conical Diffusers of Axial Turbomachines]. *Jenergomashinostroenie*, 1972, no. 2, pp. 27–28. (In Russian).
4. Subotovich, V. P., Temchenko, S. A. Obratnaja zadacha dlja kol'cevogo kanala [Inverse Problem for the Axial Ring Duct]. *Visnyk NTU «KhPI»: zб. nauk. prats'.* Ser.: *Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya* – Proc. NTU “KhPI”. “Power and heat engineering processes and equipment”, 2010, vol. 3, pp. 56–60.
5. Subotovich, V. P., Yudin, Yu. A., Yudin, A. Yu., Temchenko, S. A. Rezul'taty testirovaniya metoda rascheta teche-nija v kol'cevyyh kanalah [The Test Results of Calculation Method of Flow in an Annular Duct]. *Visnyk NTU «KhPI»: zб. nauk. prats'.* Ser.: *Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya* – Proc. NTU “KhPI”. “Power and heat engineering processes and equipment”, 2012, no. 8, pp. 91–94.
6. Subotovich, V. P., Yudin, A. Yu., Temchenko, S. A. Primenenie obratnoj ajerodinamicheskoy zadachi dlja optimizacii kol'cevyyh diffuzornyh kanalov [Application of Inverse Aerodynamic Problem for Annular Diffuser Ducts Optimization]. *Aerospace Technic and Technology*, 2015, no. 10 (127), pp. 77–80.

7. Subotovich, V., Yudin, Yu., Yudin, A., Temchenko, S. O rezul'tatah ajerodinamicheskikh raschetov osekol'cevyyh konicheskikh diffuzorov [On the Data of Aerodynamic Computations of Axianular Divergent Cones]. *Visnyk NTU «KhPI» : zb. nauk. prats'.. Ser. :*

Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya – Proc. NTU “KhPI”. “Power and heat engineering processes and equipment”, 2016, no. 10(1182), pp. 131–135, DOI : 10.20998/2078-774X.2016.10.19.

Поступила в редакцию 1.06.2015, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІСЕКІЛЬЦЕВИХ ДИФУЗОРІВ ПРИ РІЗНИХ КУТАХ ЗАКРУЧУВАННЯ ПОТОКУ НА ВХОДІ

В. П. Суботович, Ю. О. Юдін, О. Ю. Юдін, С. О. Темченко

Проведено розрахункове дослідження впливу кута вхідної закрутки потоку на втрати і течію в спроектованому авторами статті оптимальному вісекільцевому дифузорі з криволінійними поверхнями і в двох вісекільцевих конічних дифузорах з прямолінійними поверхнями. Дифузори мають однакові відношення середнього діаметра до висоти каналу на вході і значення ступеня розширення. Кут закручування потоку на вході у всіх дифузорів змінювався в діапазоні від 0 до 40 градусів. Показано, що у оптимального дифузора темп зростання коефіцієнта повних втрат нижче у всьому дослідженому діапазоні кутів закрутки на вході, ніж у дифузорів з прямолінійними поверхнями.

Ключеві слова: турбомашина, вісесиметрична течія, кільцевий дифузор, пряма та обернена аеродинамічні задачі, кут закрутки потоку.

THE RESEARCH OF AXIS - ANNULAR DIFFUSERS FOR DIFFERENT FLOW ANGLES OF TWIST AT THE INLET

V. P. Subotovich, Yu. A. Yudin, A. Yu. Yudin, S. A. Temchenko

A design study of the impact twist angles of flow at the inlet in the loss and flow over-designed by the authors in an optimal axis - annular diffuser with curved outline and in two axis - annular conical diffusers with straight outline. Diffusers have the same average diameter to height ratio of the inlet duct and the expansion value. Twist angle of the flow at the inlet all diffusers varied in the range of 0 to 40 degrees. It is shown that the optimal diffuser growth rate of total loss coefficient lower than in all the range covered of twist angles at the inlet than the diffusers with straight outline.

Key words: turbo-machine, axial-symmetric flow, annular diffuser, direct and inverse aerodynamic problems, angle of twist flow.

Субботович Валерия Петрович – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. каф. турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Юдин Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, проф. каф. турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Юдин Александр Юрьевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр. каф. турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Темченко Сергей Александрович – канд. техн. наук, науч. сотр. каф. турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Subotovich Valery – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of Turbine Construction Department, National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Yudin Yuriy – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of Turbine Construction Department, National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, Ukraine; e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Yudin Alexander – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of Turbine Construction Department, National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: alex78ua@yahoo.com.

Temchenko Sergey – Candidate of Technical Sciences, Researcher of Turbine Construction Department National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: alex78ua@yahoo.com.