

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

### **О РЕЗУЛЬТАТАХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ ОСЕКОЛЬЦЕВЫХ КОНИЧЕСКИХ ДИФФУЗОРОВ**

**АННОТАЦИЯ** Представлены сравнительные расчётные исследования осекольцевых конических диффузоров с помощью CFD-программы. В расчетах использовались модели турбулентности, которые заложены в CFD-программу. Угол раскрытия наружного обвода диффузоров изменялся в диапазоне  $\alpha = 11^\circ\text{--}36^\circ$  при изменении степени расширения диффузора  $n = 2\text{--}4$ . CFD-расчёты сравнивались с известной экспериментальной кривой Кляйна, которая делит плоскость ( $\alpha\text{--}n$ ) на две области: безотрывную и отрывную. Расчёты показали, что удовлетворительно моделировать безотрывные и отрывные течения в диффузорах подобного типа позволяет модель турбулентности (Spalart-Allmaras (S-A)).

**Ключевые слова:** кольцевой диффузор, степень расширения, угол раскрытия, осесимметричное течение, CFD-расчет, модель турбулентности.

**V. P. SUBOTOVICH, Yu. A. YUDIN, A. Yu. YUDIN, S. A. TEMCHENKO**

### **ON THE DATA OF AERODYNAMIC COMPUTATIONS OF AXIANNULAR DIVERGENT CONES**

**ABSTRACT** Comparative design investigations of axiannular divergent cones were carried out using the CFD software. Turbulence models built-in into the CFD-software were used for the computations, in particular Spalart-Allmaras (S-A),  $k\text{--}\omega$  Shear Stress Transport ( $k\text{--}\omega$  SST), V2F. The aperture angle of the external by-pass of cones varied in the range of  $\alpha = 11^\circ\text{--}36^\circ$ , while the cone expansion degree varied as  $n = 2\text{--}4$ . The data of CFD computations were compared with the known experimental curve obtained by Klein and confirmed by Zariankin, which divides the plane ( $\alpha\text{--}n$ ) into two regions: unseparated flow and separated flow regions. The region above this curve represents the separated flow in the cone at any combination of parameters ( $\alpha\text{--}n$ ), and the region below this curve represents the unseparated flow. The computations done using the CFD-software for axiannular divergent cones in the studied range of the relationships of geometric parameters ( $\alpha\text{--}n$ ) showed that the use of  $k\text{--}\omega$  SST and V2F models results in the flow separation in the cones situated in the unseparated flow region, which runs counter to the experimental data, and the use of the turbulence model S-A provided the unseparable flow in the region below the experimental Klein curve and resulted in the flow separation in the region below this curve. Design investigations showed that the turbulence model (Spalart-Allmaras (S-A)) provides an opportunity for the satisfactory simulation of unseparable and separable flows in the cones of this type.

**Key words:** annular cone, expansion degree, aperture angle, axially symmetric flow, CFD-computation and the turbulence model.

#### **Введение**

До сих пор достоверным способом получения информации об аэродинамических качествах элементов проточной части турбины является корректно поставленный эксперимент, особенно в диффузорных устройствах, предрасположенных к возникновению отрывных явлений. Но для экспериментальных исследований необходимы большие финансовые и временные затраты. Чтобы уменьшить время на проектирование и доводку применяются различные расчетные методики. Они имеют эмпирическую и полумпирическую основу [1, 2] и позволяют при небольшой затрате времени получить относительно достоверный результат. Однако область их применения ограничена диапазоном геометрических и режимных параметров, в котором выполнены экспериментальные исследования.

Расчет вязкого течения с помощью уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, в принципе позволяет решить все основные проблемы проектирования проточных частей турбома-

шин, а именно: надежно оценить распределения параметров потока, уровень потерь энергии в диффузорных элементах, а также определить области отрыва потока в них. Однако, использование уравнений Навье-Стокса связано с рядом существенных трудностей. Прежде всего, следует отметить, что точность расчетов не гарантирована для всех возможных конструкций диффузорных элементов. Только моделей турбулентности, необходимых для замыкания уравнений Навье-Стокса, известно множество и нет оснований ожидать появления единой универсальной модели турбулентности, которая позволит одинаково успешно выполнять расчеты во всем диапазоне режимов работы турбомашин. А наиболее сложной проблемой является настройка параметров сетки и выбор модели турбулентности, которые обеспечивают соответствие с данными эксперимента. При этом эксперимент должен быть проведен на диффузорных элементах со схожими геометрическими параметрами, а также для конкретных режимов работы [3–7].

### Постановка задачи исследования

Основная задача расчётного исследования вариантов осекольцевых конических диффузоров заключалась в выборе модели турбулентности и параметров сетки, при которых течение, получаемое в результате расчётов, не должно противоречить известным экспериментальным данным в широком диапазоне углов раскрытия конуса наружного обвода –  $\alpha$  и степеней расширения диффузоров –  $n$ .

На рис. 1 показаны геометрические соотношения ( $\alpha$ – $n$ ) исследованных осекольцевых конических диффузоров и экспериментальная предельная линия, полученная Кляйном для плоских и конических диффузоров [1], и подтверждённая для осекольцевых диффузоров Зарянкиным [8], которая делит плоскость ( $\alpha$ – $n$ ) на две области: отрывных и безотрывных диффузоров.

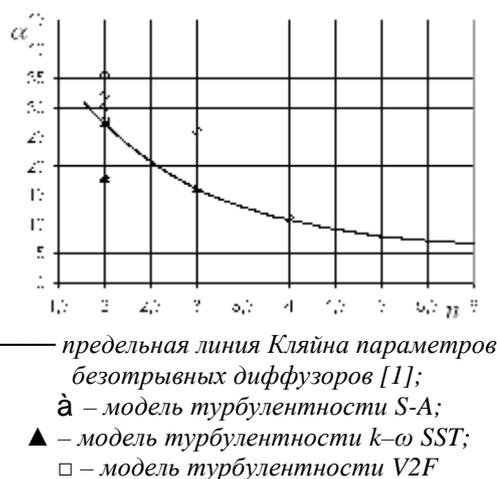


Рис. 1 – Геометрические соотношения ( $\alpha$ – $n$ ) исследованных осекольцевых конических диффузоров с цилиндрическим внутренним обводом относительно линии Кляйна

В расчётах применялись модели турбулентности, которые традиционно используются в CFD программах. Исследовано восемь вариантов диффузорных каналов в осесимметричной постановке при трёх степенях расширения  $n = 2, 3, 4$ . Сетка в расчётных областях строилась таким образом, чтобы параметр  $y^+$  в пограничном слое был близким к единице, а в остальной области размер ячейки был примерно одинаковым у всех диффузоров. Количество ячеек сетки находилось в диапазоне 50000–150000 и определялось размерами диффузора.

Со степенью расширения  $n = 2$  исследовано пять диффузоров, со степенью расширения  $n = 3$  – два диффузора, а со степенью расширения  $n = 4$  исследован один диффузор. В расчётных исследованиях использовались три модели турбулентности: Spalart-Allmaras (S-A), k-ω SST и V2F.

### Результаты расчётных исследований

Диффузор с геометрическими параметрами  $n = 2$ ,  $\alpha = 27,5^\circ$ ,  $l = 0,65$  м находится на предельной кривой Кляйна (рис. 1). По экспериментальным данным течение в таком диффузоре должно не иметь отрывов. Расчёты показали, что при использовании моделей k-ω SST и V2F имеет место отрыв потока от наружного обвода диффузора вблизи выходного сечения (рис. 2б, в), а при использовании модели турбулентности S-A получено безотрывное течение во всем канале (рис. 2а), что соответствует экспериментальным данным.

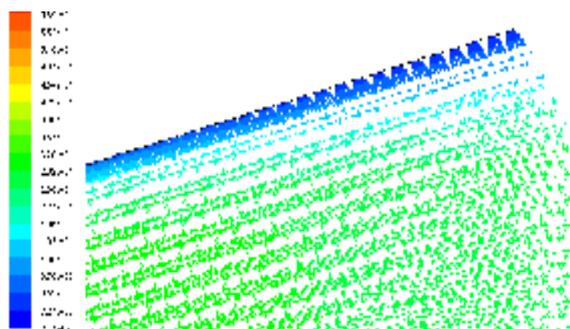
Диффузор  $n = 2$ ,  $\alpha = 18,3^\circ$ ,  $l = 1$  м находится ниже предельной линии Кляйна (рис. 1). Течение в таком диффузоре гарантированно не должно иметь отрывов по экспериментальным данным [1]. Проведённые расчёты показали, что и для этого диффузора применение моделей турбулентности k-ω SST и V2F дало отрывной характер течения перед выходным участком на наружном обводе (рис. 3б, в), в то же время при использовании модели турбулентности S-A получено безотрывное течение (рис. 3а).

Диффузор с параметрами  $n = 3$ ,  $\alpha = 16^\circ$ , который находится на экспериментальной предельной линии Кляйна (рис. 1), рассчитан с использованием двух моделей турбулентности S-A и k-ω SST. Для модели турбулентности k-ω SST зафиксировано появление «пузырчатого» отрыва на наружном обводе диффузора, а для модели турбулентности S-A получено безотрывное течение на всех участках этого диффузора.

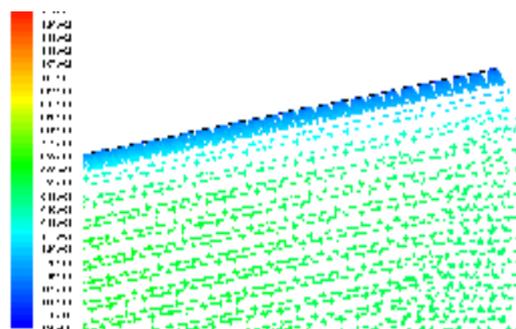
Модель турбулентности S-A проверена также для диффузора  $n = 4$ ,  $\alpha = 11^\circ$ , который находится на предельной линии Кляйна параметров безотрывных диффузоров (рис. 1). Расчет показал, что и для этого диффузора применение модели S-A подтвердило экспериментально полученное безотрывное течение.

Расчёты диффузоров из безотрывной области с использованием моделей турбулентности V2F и k-ω SST дают отрыв потока, поэтому использовать эти модели турбулентности для расчётов диффузоров в отрывной области нецелесообразно.

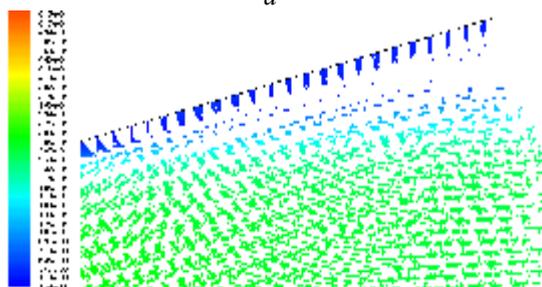
Таким образом, дальнейшие исследования модели турбулентности S-A проводились для диффузоров с геометрическими параметрами ( $\alpha$ – $n$ ), которые расположены выше кривой Кляйна (течение с отрывом потока). Со степенью расширения  $n = 2$ , рассчитаны три осекольцевых конических диффузора с углами раскрытия  $\alpha = 30^\circ, 32^\circ, 35,7^\circ$ , со степенью расширения  $n = 3$ , рассчитан диффузор с  $\alpha = 26^\circ$ .



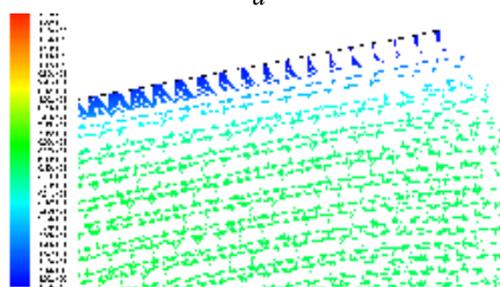
а



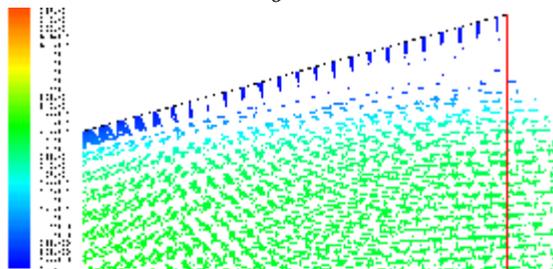
а



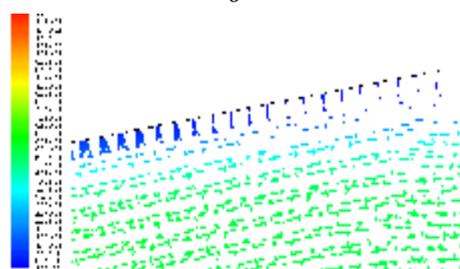
б



б



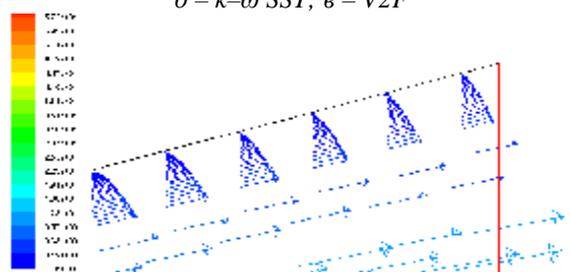
а



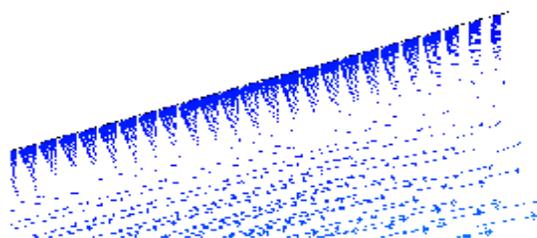
а

Рис. 2 – Влияние модели турбулентности на векторы скорости в диффузоре  $n = 2$ ,  $\alpha = 27,5^\circ$ ,  $l = 0,65$  м: а – модель турбулентности S-A; б –  $k-\omega$  SST; в – V2F

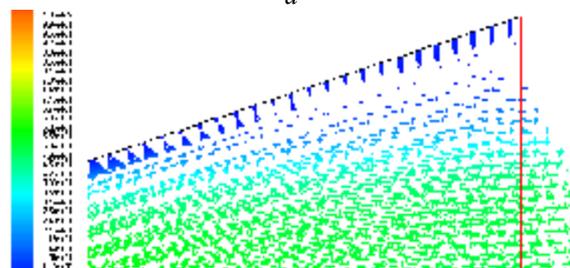
Рис. 3 – Влияние модели турбулентности на векторы скорости в диффузоре  $n = 2$ ,  $\alpha = 18,3^\circ$ ,  $l = 1$  м: а – модель турбулентности S-A; б –  $k-\omega$  SST; в – V2F



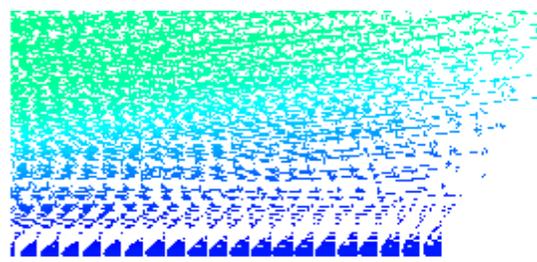
а



а



б



б

Рис. 4 – Векторы скорости возле наружного обвода выходного участка диффузоров  $n = 2$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $32^\circ$  с моделью турбулентности S-A: а –  $n = 2$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ; б –  $n = 2$ ,  $\alpha = 32^\circ$

Рис. 5 – Векторы скорости в периферийной зоне выходного участка диффузора  $n = 2$ ,  $\alpha = 35,7^\circ$ ,  $l = 0,5$  м с моделью турбулентности S-A: а – наружный обвод диффузора; б – внутренний обвод диффузора

В диффузоре со степенью расширения  $n = 2$  увеличение угла раскрытия от  $27,5^\circ$  до  $30^\circ$  привело к появлению небольшого пузырчатого отрыва потока (рис. 4), большее увеличение угла раскрытия  $\alpha = 32^\circ$  привело к развитому отрыву потока от наружного обвода диффузора (рис. 4) и к отрывам потока, как от наружного, так и от внутреннего обводов у диффузора с углом раскрытия  $\alpha = 35,7^\circ$  (рис. 5). Расчёт диффузора  $n = 3$  и  $\alpha = 26^\circ$  также показал отрыв потока от наружного обвода диффузора.

### Выводы

Выполнены расчёты течения в осекольцевых конических диффузорах с помощью CFD-программы для диапазона геометрических параметров ( $\alpha$ - $n$ ):  $\alpha = 11^\circ \dots 35,7^\circ$  и  $n = 2, 3, 4$ .

Для экспериментально исследованных безотрывных диффузоров расчёты при использовании моделей турбулентностей  $k$ - $\omega$  SST и V2F показали, что в каналах имеет место отрывное течение.

Расчёты течения в диффузорах и том же диапазоне геометрических параметров ( $\alpha$ - $n$ ) при использовании модели турбулентности S-A показали удовлетворительные результаты: отрывные явления отсутствуют у диффузоров, параметры ( $\alpha$ - $n$ ) которых лежат ниже экспериментальной кривой Кляйна, а для диффузоров, параметры которых лежат выше этой кривой, имеют место отрывы потока.

Таким образом, на основе проведенных расчетных исследований можно заключить, что для осекольцевых конических диффузоров модель турбулентности S-A позволяет с достаточной степенью достоверности моделировать безотрывные и отрывные течения.

### Список литературы

- 1 Дейч, М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – М. : Энергия. – 1970. – 384 с.
- 2 Дорфман, А. Ш. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / А. Ш. Дорфман, М. М. Назарчук, Н. И. Польский, М. И. Сайковский. – М. : Изд. АН УССР. – 1960. – 292 с.
- 3 Мингазов, Б. Г. Выбор моделей турбулентности и параметров сетки для расчёта течений в диффузорных каналах [Текст] / Б. Г. Мингазов, И. С. Давлетшин // Известия Вузов. Авиационная техника. – Казань, 2011. – № 4. – С. 24–28.
- 4 Buice, C. U. Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser [Text] / C. U. Buice, J. K. Eaton // Journal of Fluids Engineering. – 2000. – Vol. 122, № 2. – P. 433–435.
- 5 Azad, R. S. Turbulent flow in a conical diffuser [Text] / R. S. Azad // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1996. – Vol. 13, № 4. – P. 318–337.
- 6 Obi, S. Experimental and computational study of turbulent separating flow in an asymmetric plane diffuser [Text] / S. Obi, K. Aoki, S. Masuda // Proc. of the 9th International Symposium on Turbulent Shear Flows, Japan, 1993. – Berlin ; N.Y. : Springer-Verlag, 1995. – P. 305-1–305-4.
- 7 Гарбарук, А. В. Моделирование турбулентности в расчётах сложных течений [Текст] : учеб. пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
- 8 Зарянкин, А. Е. Новый способ управления отрывом потока рабочих сред в широкоугольных диффузорах паровых и газовых турбин [Текст] / А. Е. Зарянкин, А. Н. Парамонов, Е. Ю. Григорьев, Д. Е. Бузулуцкий, П. С. Хазов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 5. – С. 5–10. – ISSN 2072-2672. – doi: 10.17588.

### Bibliography (transliterated)

- 1 Deich, M. E. and Zaryankin A. E. (1970), *Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Diffusers and exhaust chamber turbomachinery gas dynamics]*, Jenergiya [Energy], Moscow, Russia.
- 2 Dorfman, A. S., Nazarchuk, M. M., Polish, N. I. and Saikovskiy, M. I. (1960), *Ajerodinamika difuzorov i vyhlopnih patrubkov turbomashin [Aerodynamics of the diffusers and exhaust chamber turbomachinery]*, Izd. AN USSR, Moscow, Russia.
- 3 Mingazov, B. G. and Davletshin, I. S. (2011), “Vybor modelej turbulentsnosti i parametrov setki dlja raschjota techenij v diffuzornyh kanalah [The choice of turbulence models and grid parameters for the calculation of flows in diffuser ducts]”, *Izvestija Vuzov. Aviacionnaja tehnika [Proceedings of the universities. Aviation equipment]*, Kazan, Russia, no. 4, pp. 24–28.
- 4 Buice, C. U. and Eaton, J. K. (2000), “Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser”, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 122, no. 2, pp. 433–435.
- 5 Azad, R. S. (1996), “Turbulent flow in a conical diffuser”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 13, no. 4, pp. 318–337.
- 6 Obi, S., Aoki, K. and Masuda, S. (1995), “Experimental and computational study of turbulent separating flow in an asymmetric plane diffuser”, *Proc. of the 9th International Symposium on Turbulent Shear Flows, Japan, 1993*, Springer-Verlag, Berlin ; N.Y., pp. 305-1–305-4.

- 7 **Garbaruk, A. V., Strelets, M. H. and Chur, M. L.** (2012), *Modelirovanie turbulentnosti v raschjotah slozhnyh techenij [Modeling of turbulence in the calculation of complex flows]*, Izd-vo Politehn. un-ta [Publishing Polytechnic University], St. Petersburg, Russia.
- 8 **Zaryankin, A. E., Paramonov, A. N., Grigoriev, E. Yu., Buzulutsky, D. E. and Khazov, P. S.** (2014), "Novyj sposob upravlenija otryvom potoka rabochih sred v shirokougol'nyh diffuzorah parovyh i gazovyh turbin [A new method of controlling the flow separation of the operating environment in wide-angle diffusers of steam and gas turbines]", *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jener-geticheskogo universiteta [Bulletin of Ivanovo state power University]*, no. 5, pp. 5–10, ISSN 2072-2672, doi: 10.17588.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Субботович Валерий Петрович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: [alex78ua@yahoo.com](mailto:alex78ua@yahoo.com), ORCID 0000-0002-7051-4758.

**Subotovich Valery** – Doctor of Technical Sciences, Senior research fellow, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Юдин Юрий Алексеевич** – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: [alex78ua@yahoo.com](mailto:alex78ua@yahoo.com), ORCID 0000-0002-9770-2273.

**Yudin Yuriy** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Юдин Александр Юрьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: [alex78ua@yahoo.com](mailto:alex78ua@yahoo.com), ORCID 0000-0001-5098-7796.

**Yudin Alexander** – Candidate of Technical Sciences, Senior research fellow, Senior researcher of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Темченко Сергей Александрович** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры турбиностроения, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина; e-mail: [alex78ua@yahoo.com](mailto:alex78ua@yahoo.com), ORCID 0000-0001-7235-1107.

**Temchenko Sergey** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), junior researcher of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Субботович, В. П.** О результатах аэродинамических расчётов осекольцевых конических диффузоров [Текст] / **В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. Ю. Юдин, С. А. Темченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 131–135. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.19.

*Please cite this article as:*

**Subotovich, V., Yudin, Yu., Yudin, A. and Temchenko, S.** (2016), "On the Data of Aerodynamic Computations of Axianular Divergent Cones<sup>2</sup>", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 131–135, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.19.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Субботович, В. П.** Про результати аеродинамічних розрахунків вісекільцевих конічних дифузоров [Текст] / **В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, О. Ю. Юдин, С. А. Темченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 131–135. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.19.

**АНОТАЦІЯ** Представлені порівняльні розрахункові дослідження вісекільцевих конічних дифузоров за допомогою CFD-програми. При розрахунках використовувалися моделі турбулентності, які були закладені у CFD-програму. Кут розкриття зовнішнього обводу дифузоров змінювався в діапазоні  $\alpha = 11^\circ - 36^\circ$  при зміні ступеня розширення дифузора  $n = 2 - 4$ . CFD-розрахунки порівнювалися з відомою експериментальною кривою Кляйна, яка ділить площину ( $\alpha - n$ ) на дві області: безвідривну і відривну. Розрахунки показали, що задовільно моделювати безвідривні і відривні течії в дифузорах подібного типу дозволяє модель турбулентності Spalart-Allmaras (S-A).

**Ключові слова:** кільцевий дифузор, ступінь розширення, кут розкриття, вісесиметрична течія, CFD-розрахунок, модель турбулентності.

Поступила (received) 28.01.2016