

DOI 10.15589/jnn20160410
 УДК 62.135
 P51

INFLUENCE OF COUNTERPRESSURE ON GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE OUTLET STRAIGHTENER OF LOW PRESSURE COMPRESSOR IN HETEROGENEOUS FLOW

ВЛИЯНИЕ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНОГО СПРЯМЛЯЮЩЕГО АППАРАТА КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

Mykola V. Ryndia
 mykola.ryndia@nuos.edu.ua
 ORCID: —

Н. В. Рындя,
 канд. техн. наук

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. Outlet straightener (OS) is a stationary cage of a strait radial profiles which dispose between low and high pressure compressor of the GTE and has the functions of the barring set and the guide grid simultaneously. At the same time OS should produce the homogeneous outlet flow at the minimal full hydrodynamic losses. Unlike compressor and turbine vane cascade whereupon variation of pressure along the flow exist owing change (increasing or reduction) velocity, in straightener it occurs only because of hydrodynamic losses in boundary layers of vane cascade. Therefore, any change of static pressure in flow direction (lengthwise static pressure gradient) in OS will caused change in pressure distribution around the contour of blades [3, 4] and therefore change its characteristics on the whole. The aim of the research is to receive a data about the variations of the main hydrodynamic characteristics of the OS as a result of deviation the static pressure gradient in the flow direction in order to have the possibility to make the highly-efficient straightener and to estimate the efficiency of the gas turbine in general. The hydrodynamic characteristics of the OS were numerically investigated using the FLOW VISION fundamentals. The segment of the fully dimensional OS of the stationary gas turbine engine was used as a calculation object [1, 2]. It had two neighboring blades passage with strait radial blade between them. The axis x, y, z of the right angle coordinate system was coincided with circumferential, radial and axial directions, respectively. The calculations were provided by using the datum-model of the FLOW VISION turbulent flow — «*weakly-compressible liquid*» which is based on the standard «*k- ϵ model of turbulence*». The obtained results of the numerical calculation reflect that reduction of lengthwise static pressure gradient in OS in any type of inlet flow cause more fluent profile flow, reduction of profile losses and, as a result, raise the total pressure recovery coefficient of OS and homogeneity of the velocity field at its exit.

Keywords: gas dynamic characteristics; straightener; hydrodynamic losses; the total pressure recovery coefficient.

Аннотация. Численным методом на базе программного комплекса Flow Vision определены газодинамические характеристики выходного спрямляющего аппарата (ВСА) в потоке на выходе осевого компрессора низкого давления газотурбинного двигателя. Дана оценка влияния неоднородности потока на входе в аппарат и продольного градиента статического давления на его характеристики.

Ключевые слова: выходной спрямляющий аппарат; газодинамические характеристики; гидродинамические потери; коэффициент восстановления полного давления.

Анотація. Методом обчислювальної гідродинаміки на базі програмного комплексу Flow Vision досліджені газодинамічні характеристики вихідного спрямляючого апарату (ВСА) на виході компресора низького тиску. Дана оцінка впливу неоднорідності потоку на вході в апарат і продольного градієнта статичного тиску на його характеристики.

Ключові слова: вихідний спрямляючий апарат; гідродинамічні втрати; коефіцієнт відновлювання повного тиску; неоднорідність потоку.

REFERENCES

- [1] Ryndya N. V. *Vtorichnye techeniya v mezhlopatochnom kanale osevoy turbomashiny* [Secondary flows in a blade passage of axial turbomachine]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2010, issue 4, pp. 89–94.

- [2] Ryndya N. V. *Gazodinamicheskie kharakteristiki vykhodnogo spryamlyayushchego aparata KND GTD pri ner-aschyetnykh uglakh vkhoda potoka* [Gas dynamic characteristics of outlet straightener CLP GTE at off-design inlet flow angles]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUOS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2014, issue 6, pp. 24–26.
- [3] Khalatov A. A., Kovalenko A. S. *Teploobmen i gidrodinamika uskorenogo potoka v ploskikh krivolineynikh kanalakh* [Heat exchange and hydrodynamics in planar curved channels with flow acceleration]. Kyiv, Naukova dumka Publ., NAN Ukraine, 2006. 223 p.
- [4] Schlichting H. *Teoriya pogranychnoy sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 711 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Совершенствование аэродинамики проточной части осевых турбомашин было и остаётся актуальной задачей в плане повышения их эффективности. Одним из возможных путей решения этой проблемы для осевого компрессора ГП НПКГ «Заря» – «Машпроект» является использование спрямляющего аппарата между КНД и КВД. Аппарат представляет собой неподвижную обойму радиальных профилей, основные геометрические характеристики которых приведены в [2]. Поток на входе в аппарат крайне неоднороден как по величине скорости, так и по направлению. Угол набегающего потока меняется по радиусу решетки в пределах от $35,5^\circ$ у ступицы до 38° на периферии, а на среднем радиусе он составляет $\sim 42^\circ$. Такое отклонение параметров потока от расчетных неизбежно приведет к нарушению распределения давления по контуру профилей, изменению характера их обтекания [4] и, в конечном итоге, к изменению газодинамических характеристик аппарата в целом.

В спрямляющей решетке, в отличие от турбинной и компрессорной решеток, изменение давления в направлении потока (продольный градиент статического давления) обусловлено лишь потерями. Поскольку преобладающую долю этих потерь составляют потери в пограничном слое лопаток, следовательно, совокупное действие продольного градиента давления и формы профиля лопатки определяет распределение давления по контуру лопатки, а тем самым характер течения в пограничном слое [3, 4] и, в конечном итоге, эффективность выходного спрямляющего аппарата (ВСА) в целом.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — установить закономерности изменения газодинамических характеристик выходного спрямляющего аппарата при изменении продольного градиента статического давления в аппарате в условиях однородного и неоднородного набегающего потока, необходимых для оценки эффективности двигателя в целом и создания высокоэффективного спрямляющего аппарата.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования проводились на модели полноразмерного ВСА осевого КНД стационарной ГТУ. Расчетная область, принятая система координат и математическая модель расчетного программного комплекса

Flow Vision полностью соответствовали изложенным в статьях [1, 2].

Расчетная область разделялась на $60 \times 60 \times 60$ ячеек с объемом $0,002 \times 0,0013 \times 0,0013$ м³ каждая. При уровне адаптации равном 2 общее число ячеек составляло $1,68 \cdot 10^6$, а число расчетных ячеек $\sim 10^6$. Применимость принятой математической модели для решения поставленной задачи доказана в работе [2].

Для оценки влияния противодавления на газодинамические характеристики ВСА были реализованы варианты численного решения, моделирующие гидродинамику аппарата в однородном и неоднородном набегающем потоке. Параметры однородного потока *на входе* во всех вариантах были идентичны, а именно: избыточное статическое давление $p_{w1} = 2,938 \cdot 10^5$ Па; температура $T_{w1} = 440,3$ °К; приведенная скорость $\lambda_1 = 0,53$; Угол входа однородного потока $\alpha_1 = 35^\circ$; вектор массовой скорости $\rho V_1 = 651$ кг/м²·с. *На выходе*: избыточное статическое давление задавалось в диапазоне $p_{w2} = 0,8 p_{w1} - 1,07 p_{w1}$.

Параметры неоднородного потока на входе в ВСА характеризуются изменением угла α_1 по высоте проточной части. По данным организации угол входа потока меняется по радиусу решетки в пределах от $35,5^\circ$ у ступицы до 38° на периферии. На среднем радиусе он составляет $\sim 42^\circ$. Такой закон изменения угла входа был заложен в расчет в виде изменения окружной составляющей массовой скорости по радиусу при сохранении средней по расходу массовой скорости $\rho V_n = \rho V_z = 416,78$ кг/м²·с, соответствующей номинальному режиму работы ВСА

$$\rho V_{x1} = (2,1865293 \cdot 10^9) y^5 + (4,2717116 \cdot 10^9) y^4 - (3,3257827 \cdot 10^9) y^3 + (1,2979263 \cdot 10^9) y^2 - (2,5237898 \cdot 10^8) y + (1,9603394 \cdot 10^7),$$

где u в принятой системе координат совпадает с радиусом и изменяется в диапазоне от 0,34095 м до 0,41524 м.

Результаты численного решения приведены на рис. 1 в виде зависимости коэффициента восстановления полного давления, взятого как отношение осреднённых по площади полных давлений в потоке на выходе и входе в ВСА, т.е. $\sigma = p_{n2}/p_{n1}$. Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов. Максимальное отклонение не превышает $\pm 0,003$.

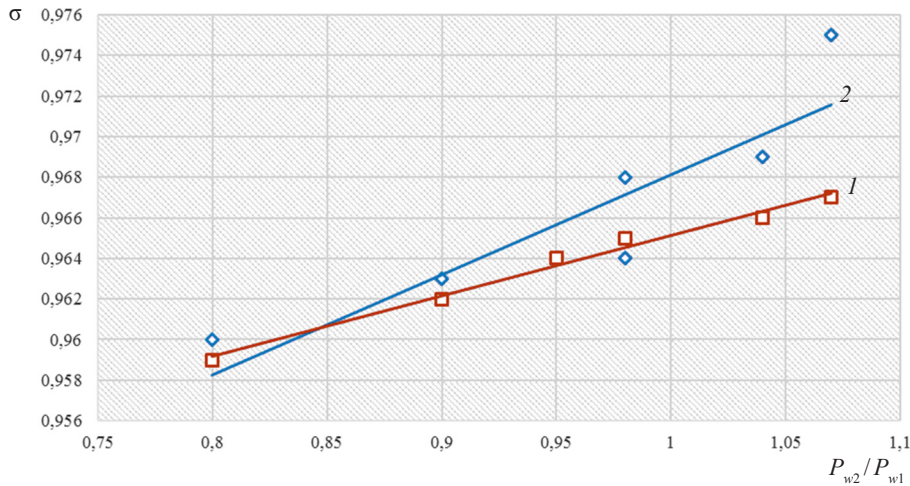


Рис. 1. Влияние противодавления на коэффициент восстановления полного давления ВСА:
1 — при однородном потоке на входе; 2 — при неоднородном потоке на входе

Из рис. 1 следует, что эффективность спрямляющего аппарата в однородном набегающем потоке выше, чем в неоднородном и нарастание σ в первом приближении может быть аппроксимировано линейной зависимостью:

$$\sigma = 0,048 P_{w2}/P_{w1} + 0,920.$$

Эффективность ВСА в неоднородном набегающем потоке в исследованном диапазоне противодавлений остаётся ниже и по абсолютному значению, и по темпу нарастания:

$$\sigma = 0,0296 P_{w2}/P_{w1} + 0,935.$$

Коэффициент сопротивления спрямляющего аппарата определяется как отношение потери полного давления, равного разности осреднённых по площади полных давлений на входе и выходе, к полному давлению на входе, т.е. $\xi = (P_{n1} - P_{n2})/P_{n1}$. Как следует из рис. 2, с повышением противодавления, коэффициент

сопротивления ВСА в обоих случаях падает. Это падение в первом приближении может быть аппроксимировано линейными законами:

при однородном потоке

$$\xi = -0,0523 P_{w2}/P_{w1} + 0,0837;$$

при неоднородном потоке

$$\xi = -0,0303 P_{w2}/P_{w1} + 0,0646.$$

Важной газодинамической характеристикой спрямляющего аппарата является однородность поля скорости в выходном сечении, как по величине, так и направлению. Анализ результатов исследования скорости в плоскости выхода по радиальному направлению и по шагу решетки на среднем радиусе показал, что в радиальном направлении поле скорости практически не меняется. Однородность поля скорости нарушается лишь в небольшой области вблизи ступицы ВСА по причине возникновения крупно-

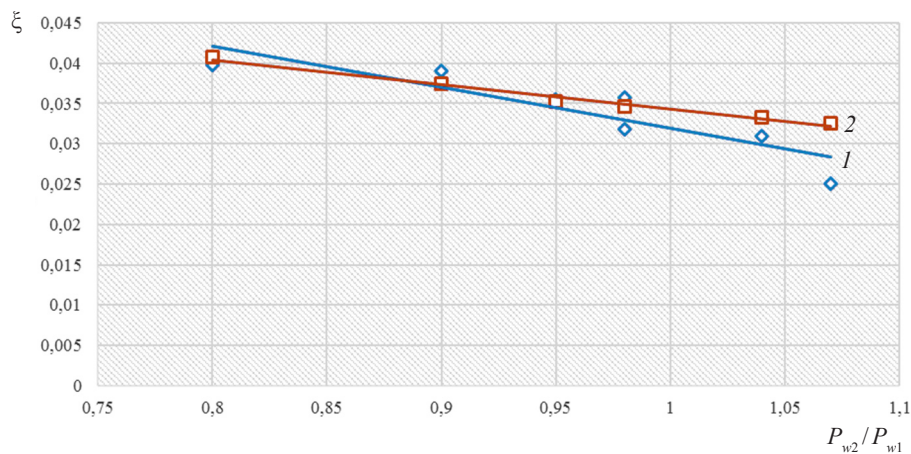


Рис. 2. Влияние противодавления на гидравлическое сопротивление ВСА:
1 — при однородном потоке на входе в аппарат; 2 — при неоднородном потоке на входе

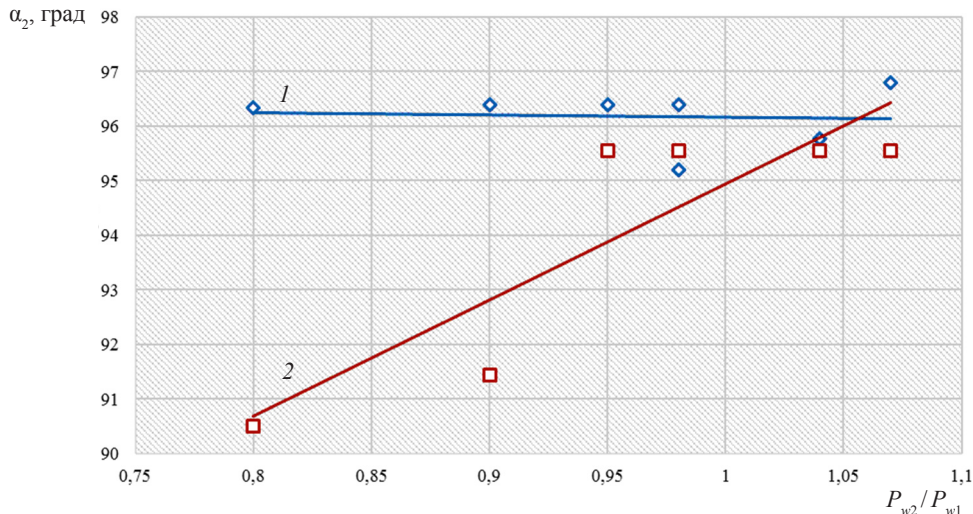


Рис. 3. Влияние протипротиваулення на кугоу вихоуа потока з ВСА на середньому раууусе:

1 — при одноронном потоке на входе $\alpha_2 = -0,891 P_{w2}/P_{w1} + 97,01$; 2 — при неодноронном потоке на входе $\alpha_2 = 51,67 P_{w2}/P_{w1} + 42,83$

масштабного вихревого образования [1, 2] в случае неодноронного потока на входе. В окружном направлении (по шагу решетки) поле скорости остается неодноронным с явно выраженным чередованием гидродинамических следов. Осредненный по площади выхода кугоу вихоуа потока α_2 увеличивается с ростом протипротиваулення (см. рис. 3) при неодноронном потоке на входе ВСА и остается практически неизменным при одноронном.

Рост осредненного по площади выхода угла вихоуа потока α_2 и приближение его к геометрическому кугоу вихоуа (100°), можно объяснить сокращением отрывных зон вблизи выходных кромок профилей и повышением равномерности поля скоростей в выходном сечении.

ВЫВОДЫ. Численным моделированием установлены закономерности изменения основных га-

зодинамических характеристик выходного спрямляющего аппарата, работающего на номинальном режиме по расходу, при изменении продольного градиента статического давления в условиях как одноронного, так и неодноронного набегающего потока. Полученные закономерности — отражают заметное улучшение основных газодинамических характеристик аппарата в исследованном диапазоне протипротиваулений (положительных градиентов статического давления) независимо от состояния потока на входе;

– могут быть напрямую использованы для оценки эффективности спрямляющего аппарата и двигателя в целом;

– указывают на целесообразность профилирования решеток спрямляющих аппаратов со слабой диффузорностью каналов в направлении потока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рындя, Н. В. Вторичные течения в межлопаточном канале осевой турбомашины [Текст] / Н. В. Рындя // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — № 4 (433). — С. 89–94.
- [2] Рындя, Н. В. Газодинамические характеристики выходного спрямляющего аппарата КНД ГТД при нерасчетных углах вихоуа потока [Текст] / Н. В. Рындя // Зб. Наук. Праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2014. — № 6 — С. 24–26.
- [3] Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах [Текст] / А. А. Халатов, А. С. Коваленко. — К. : ДНВП «Видавництво» Наукова думка «НАН України», 2006. — 223 с.
- [4] Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. — М. : Издательство «Наука», 1974. — 711 с.

© М. В. Риндя

Надійшла до редколегії 28.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. Б. Г. Тимошевський