

УДК 621.165

А.Ю. ЮДИН

*Национальный технический университет «ХПИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДИФFUЗОРОВ ВЫХОДНЫХ ПАТРУБКОВ ТУРБОМАШИН СО СПЕЦИАЛЬНЫМ ВДУВОМ ПОТОКА**

Приведены результаты расчетных аэродинамических исследований двух осесимметричных осерадиальных диффузоров со специальным вдувом потока вдоль их наружных обводов, которые характерны для выходных патрубков современных паровых турбин. В расчетных моделях диффузоров имитировалась также надбандажная радиальная протечка над рабочим колесом. Анализировались следующие характеристики: коэффициент импульса струи вдува потока, коэффициенты потерь диффузора – полных, внутренних и с выходной скоростью. Определены оптимальные параметры специального вдува и отмечено, что основное влияние на уровень полных потерь диффузора оказывает потеря с выходной скоростью, связанная с характером течения и наличием отрывных циркуляционных зон. Приведено сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: выходной патрубок турбомашин, вдув потока, коэффициенты потерь, осесимметричный диффузор, коэффициент импульса струи, циркуляционная зона.

Введение

Актуальной проблемой повышения экономичности проточной части турбомашин является аэродинамическое совершенствование выходных диффузоров и патрубков, в которых имеются отрывы потока и, соответственно, значительные резервы повышения их эффективности. Одним из действенных способов управления отрывом рабочего тела от криволинейной поверхности является вдув потока в пограничный слой. Этот способ широко применяют в авиации для обеспечения безотрывного течения и увеличения подъемной силы при отклонении закрылков крыла самолета. В осерадиальных диффузорах турбомашин управление течением на наружном обводе позволяет существенно улучшить заполнение рабочим телом проходных сечений и снизить коэффициент полных потерь выходного патрубка (ВП) [1]. В паровых турбинах начали использовать специальный вдув потока, источником которого может быть влажнопаровой поток, специально удаляемый в выходной патрубок для снижения влажности в периферийной зоне последней ступени [2, 3].

Для рационального проектирования подобных конструкций осерадиальных диффузоров необходимы детальные исследования их характеристик и анализ аэродинамических процессов, происходящих в ВП.

Экспериментальные исследования позволяют получить наиболее достоверные данные, однако, как правило, объем информации ограничен и требуются значительные затраты материальных и временных

ресурсов. В последнее время широко применяют коммерческие CFD-программы, позволяющие рассчитывать трехмерные, сжимаемые, вязкие, нестационарные потоки. В то же время их использование для сложных объектов особенно, таких как ВП, требует верификации.

Постановка задачи исследования

Приведены результаты расчетных исследований с помощью CFD двух осесимметричных моделей осерадиальных диффузоров D90 и D180 со специальным вдувом на наружном обводе, которые характерны для выходных патрубков современных паровых турбин. Компьютерные модели диффузоров отличались местом расположения выходного сечения, ($y \approx 1$, $k-\epsilon$). В модели – D90 рабочему телу необходимо повернуться к выходному сечению 2 на 90° по отношению к входному сечению 1 (рис. 1а), а в модели – D180 на 180° (сеч.3 рис. 2а). Визуализация течения представлена линиями равных расходов. Основная задача данного расчетного исследования – определить характеристики осесимметричных диффузоров с вдувом потока и сравнить с экспериментом для оценки перспектив использования CFD-программ на этапах проектирования или модернизации подобных объектов.

Варьирование параметров вдува потока осуществлялось за счет изменения давления торможения $P_{\text{ВД}}^*$ в камере вдува при неизменных давлении $P_1^* = 120,6$ кПа, температуре $T_1^* = 323$ К торможения во входном сечении 1 и давлении $P_{\text{ВЫХ}} = 101,3$ кПа в

выходных сечениях 2 или 3 для вариантов D90 или D180. Исследования диффузоров проведены в следующем диапазоне давлений торможения в камере $P_{вд}^* = 101,3\text{--}301,3$ кПа. Осредненные значения числа Маха во входном сечении 1 изменялись от 0,5 до 0,75 в зависимости от полных потерь исследуемых диффузоров. Выход потока из камеры вдува осуществлялся вдоль наружного обвода диффузора через самое узкое сечение 4 конфузорного канала (рис. 1а). Моделировалась также надбандажная радиальная протечка. В качестве рабочего тела принят воздух.

Выбор исходных параметров в расчетных исследованиях определялся режимами работы последней ступени турбины и имеющимися данными аэродинамических экспериментальных исследований осерадиального диффузора D90 и ВП.

Характеристики диффузоров

Определялись и анализировались следующие аэродинамические характеристики осерадиальных диффузоров:

Коэффициент полных потерь

$$\zeta_{\Pi} = \frac{1 - \left(P_{\text{вых}} / P_1^* \right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(P_1 / P_1^* \right)^{\frac{k-1}{k}}},$$

где P_1 и P_1^* – давление и давление торможения во входном сечении 1;

$P_{\text{вых}}$ – давление в выходном сечении 2 или 3 диффузоров D90 или D180;

k – показатель адиабаты рабочего тела.

Коэффициент потерь с выходной скоростью

$$\zeta_{\text{вых}} = \frac{1 - \left(P_{\text{вых}} / P_{\text{вых}}^* \right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(P_1 / P_1^* \right)^{\frac{k-1}{k}}},$$

где $P_{\text{вых}}^*$ – давление торможения в выходных сечениях 2 или 3 осерадиальных диффузоров D90 или D180.

Коэффициент внутренних потерь

$$\zeta = \zeta_{\Pi} - \zeta_{\text{вых}}.$$

Коэффициент импульса струи вдува

$$C_{\mu} = \frac{2 \cdot G_{\text{вд}} C_{\text{вд}}}{G_{\text{ос}} C_{\text{ос}}},$$

где $G_{\text{ос}}$ и $C_{\text{ос}}$ – расход и осредненная скорость основного потока в сечении 1;

$G_{\text{вд}}$ и $C_{\text{вд}}$ – расход и осредненная скорость потока вдува в сечении 4.

Относительный коэффициент полных потерь

$$\bar{\zeta}_{\Pi} = \zeta_{\Pi}^i / \zeta_{\Pi}^{\text{min}},$$

где ζ_{Π}^i – значения коэффициента полных потерь диффузора, соответствующие текущим значениям коэффициента импульса струи вдува C_{μ} ;

ζ_{Π}^{min} – минимальное значение коэффициента полных потерь в исследованном диапазоне коэффициента C_{μ} .

Расчетное исследование диффузора D90

На рис. 1 представлены расчетные линии равных расходов для трех значений давления торможения в камере вдува $P_{вд}^* = 101,3; 221,3; 301,3$ кПа для варианта D90. При давлении 101,3 кПа коэффициент C_{μ} имеет минимальное значение – 0,001, поток прижат к внутреннему обводу диффузора, циркуляционная зона занимает максимальный объем в исследованном пространстве диффузора. Коэффициент полных потерь ζ_{Π} и его составляющие коэффициенты $\zeta_{\text{вс}}$ и ζ имеют максимальные значения 1,07; 0,82 и 0,25, соответственно (рис. 3). С увеличением давления $P_{вд}^*$ увеличивается скорость вдува потока, основной поток начинает отклоняться в сторону наружного обвода диффузора. При этом уменьшаются размеры циркуляционной зоны (рис. 1, б) и коэффициенты потерь диффузора, которые достигают минимального значения ($\zeta_{\Pi} = 0,52$, $\zeta_{\text{вых}} = 0,35$, $\zeta = 0,17$) при давлении 221,3 кПа и коэффициенте импульса $C_{\mu} \approx 0,17$. Следует заметить, что коэффициент полных потерь при увеличении C_{μ} снижается в основном за счет коэффициента потерь с выходной скоростью $\zeta_{\text{вых}}$ (снижения коэффициентов потерь ζ_{Π} , $\zeta_{\text{вых}}$ и ζ составили 0,55, 0,47 и 0,08, соответственно). Дальнейшее увеличение давления $P_{вд}^*$ и соответственно коэффициента C_{μ} практически не изменяет течение в диффузоре D90 (рис. 1в) и его коэффициенты потерь (рис. 3).

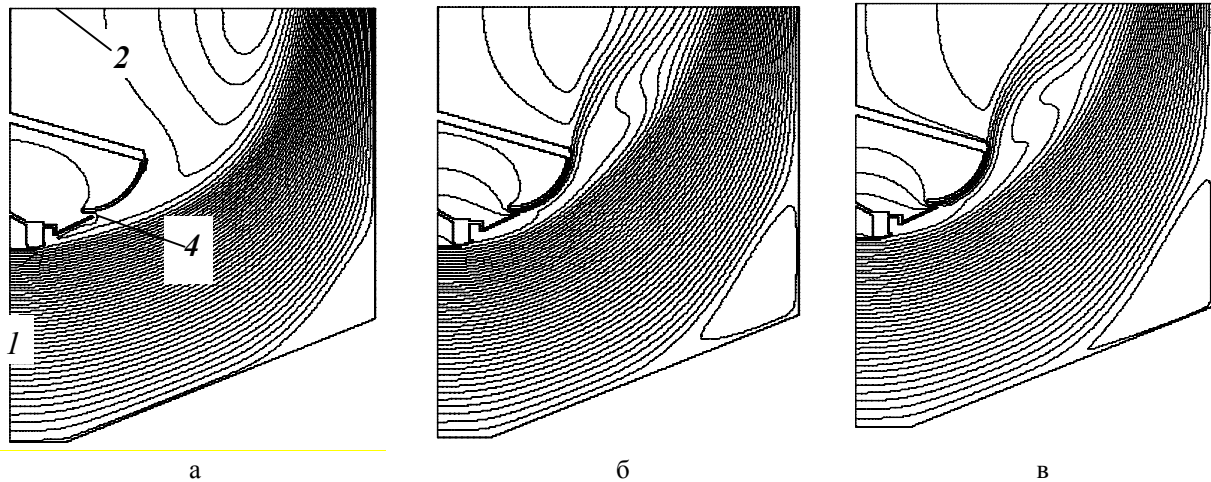


Рис. 1. Линии равных расходов диффузора D90 :

а – $C_{\mu} = 0,001$ ($P_{\text{вд}}^* = 101,3 \text{ кПа}$); б – $C_{\mu} = 0,17$ ($P_{\text{вд}}^* = 221,3 \text{ кПа}$); в – $C_{\mu} = 0,22$ ($P_{\text{вд}}^* = 301,3 \text{ кПа}$)

Расчетное исследование диффузора D180

Течение в диффузоре D180 представлено на рис. 2. При минимальном давлении в камере вдува $P_{\text{вд}}^* = 101,3 \text{ кПа}$ коэффициент импульса C_{μ} равен 0,012 (рис. 2, а), что на порядок больше, чем у варианта D90 при таком же давлении $P_{\text{вд}}^*$. Это связано с меньшими полными потерями ($\zeta_{\text{п}} = 0,78$, рис. 4) и соответственно более низким уровнем статического давления. Несмотря на отрыв от наружного обвода, основной поток, разворачивающийся на 180° , уменьшает циркуляционную зону и локализует ее за пределами наружного обвода диффузора. С увеличением C_{μ} отрыв от наружного обвода уменьшается и

на режиме с давлением $P_{\text{вд}}^*$ около 181,3 кПа и коэффициентом импульса $C_{\mu} \approx 0,13$ полностью исчезает (рис. 2, б). При этом значении C_{μ} коэффициенты потерь имеют минимальные значения $\zeta_{\text{п}} = 0,54$, $\zeta_{\text{вых}} = 0,39$, $\zeta = 0,15$ (рис. 4). Дальнейшее увеличение давления $P_{\text{вд}}^*$ и соответственно коэффициента C_{μ} (более 181,3 кПа и 0,13 соответственно) сопровождается ростом коэффициента полных потерь диффузора D180 и, в основном, только из-за потерь с выходной скоростью, поскольку коэффициент внутренних потерь остается на неизменном уровне $\zeta \approx 0,15$ (рис. 4). Эти значения коэффициента импульса ($C_{\mu} > 0,13$) можно назвать избыточными

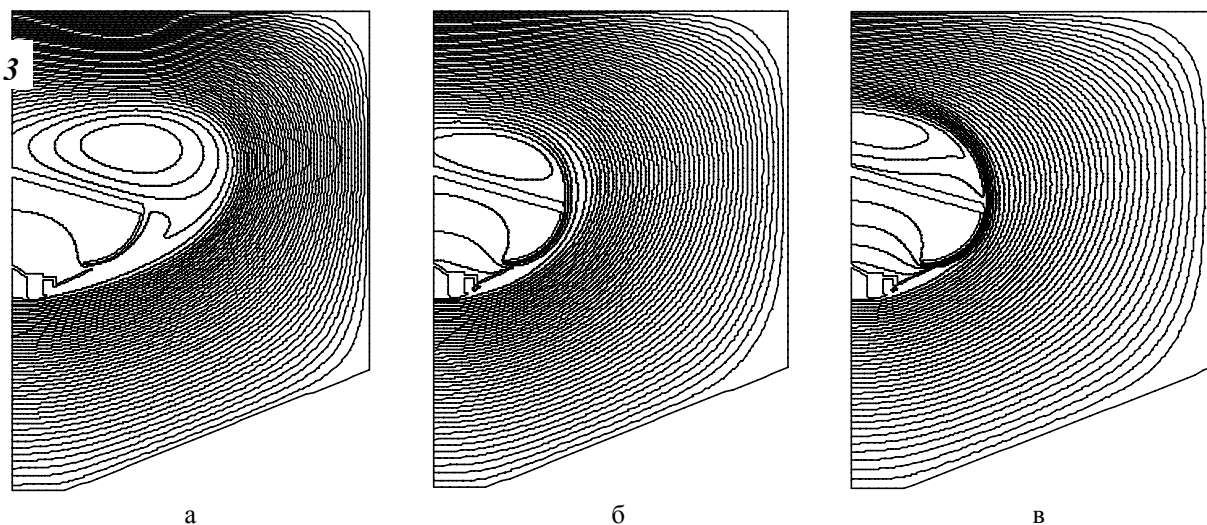


Рис. 2. Линии равных расходов диффузора D180 :

а – $C_{\mu} = 0,012$ ($P_{\text{вд}}^* = 101,3 \text{ кПа}$); б – $C_{\mu} = 0,13$ ($P_{\text{вд}}^* = 181,3 \text{ кПа}$); в – $C_{\mu} = 0,33$ ($P_{\text{вд}}^* = 301,3 \text{ кПа}$)

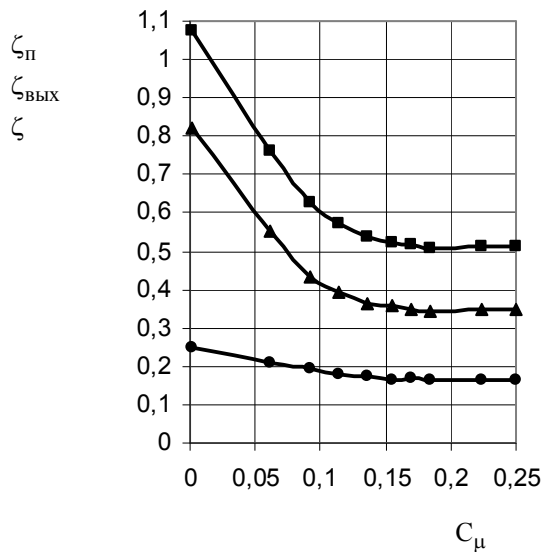


Рис. 3. Расчетные зависимости диффузора D90 :
 —■— $\zeta_{\pi} = f(C_{\mu})$, —▲— $\zeta_{\text{вых}} = f(C_{\mu})$, —●— $\zeta = f(C_{\mu})$

по отношению к оптимальному коэффициенту $C_{\mu} \approx 0,13$. В варианте диффузора D180 избыточный вдув потока приводит к оттеснению основного потока к цилиндрической стенке, увеличению циркуляционной зоны и уменьшению проходных сечений (рис. 2, в).

Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей $\bar{\zeta}_{\pi} = f(C_{\mu})$

Расчетные зависимости $\bar{\zeta}_{\pi} = f(C_{\mu})$ удовлетворительно соответствуют экспериментальным (рис. 5, 6). Эксперименты с осесимметричным диффузором D90 и ВП с односторонним выходом потока и этим же диффузором выполнены в аэродинамической лаборатории кафедры турбиностроения

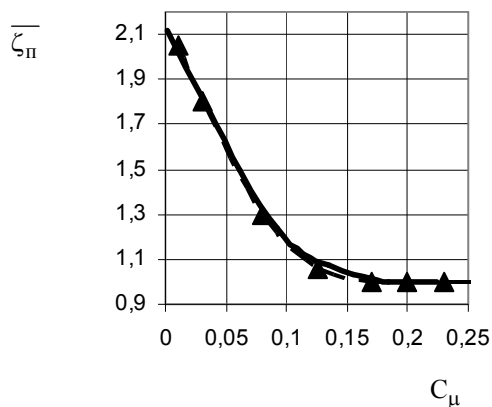


Рис. 5. Зависимости $\bar{\zeta}_{\pi} = f(C_{\mu})$:
 — расчетная, диффузор D90 ;
 —▲— экспериментальная, диффузор D90

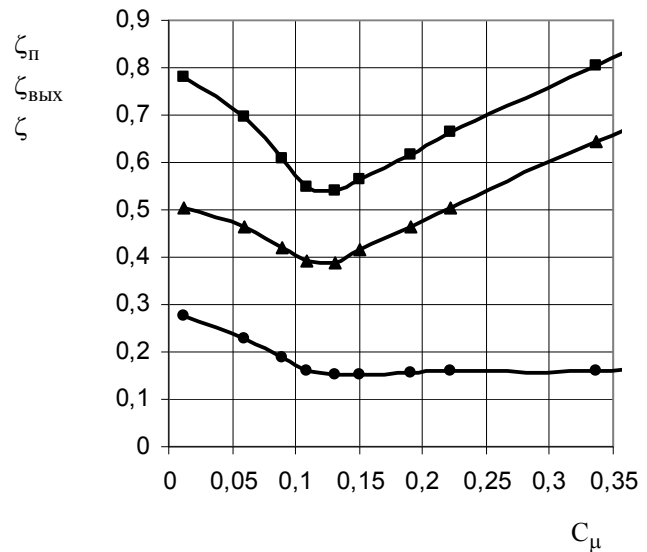


Рис. 4. Расчетные зависимости диффузора D180 :
 —■— $\zeta_{\pi} = f(C_{\mu})$, —▲— $\zeta_{\text{вых}} = f(C_{\mu})$, —●— $\zeta = f(C_{\mu})$

НТУ «ХПИ». В эксперименте использовалось два компрессора: центробежный – для основного потока и поршневой – для специального вдува потока. Это позволяло варьировать параметрами специального вдува в широком диапазоне независимо от параметров основного потока. Выход из моделей осуществлялся в лабораторный зал. Одна из основных задач экспериментальных и расчетных исследований – определение оптимального коэффициента импульса струи вдува потока C_{μ} . Оптимальный коэффициент импульса струи вдува потока ($C_{\mu} \approx 0,13$), полученный в расчете для осесимметричного диффузора D180 (рис. 6), в котором имитируется средний угол поворота потока в выхлопном патрубке, практически не отличается от значения, полученного в экспериментальных исследованиях этого диффузора совместно с пространственной сборной камерой ВП.

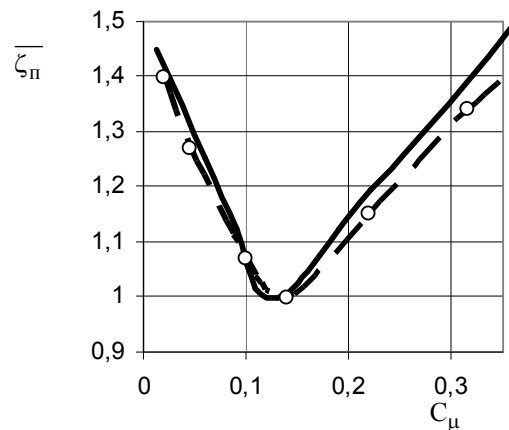


Рис. 6. Зависимости $\bar{\zeta}_{\pi} = f(C_{\mu})$:
 — расчетная, диффузор D180 ;
 —○— экспериментальная, ВП

Заключение

Получены характеристики осесимметричных диффузоров в широком диапазоне изменения коэффициента импульса струи вдува ($C_\mu = 0 - 0,35$).

Определено, что для режимов течения, когда есть отрыв потока, увеличение коэффициента импульса C_μ до определенных значений (для D90 до значения $\sim 0,17$, для D180 до $\sim 0,13$) приводит к снижению коэффициента полных потерь $\zeta_{\text{п}}$ за счет обоих его составляющих $\zeta_{\text{вых}}$ и ζ .

Расчетные зависимости $\overline{\zeta_{\text{п}}} = f(C_\mu)$ и оптимальное значение коэффициента импульса C_μ удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, что позволяет рассматривать результаты приведенных в статье расчетов в качестве практических рекомендаций для проектирования

новых и модернизации существующих выхлопных патрубков мощных паровых турбин.

Литература

1. Особенности совместной работы ступени и выхлопного патрубка турбины при различных радиальных зазорах над рабочим колесом [Текст] / А.В. Гаркуша, В.Е. Добрынин, А.В. Лапузин, Ю.А. Юдин // Теплоэнергетика, 1988. – №8. – С. 33–36.
2. Мигай, В.К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин [Текст] / В.К. Мигай, Э.И. Гудков. – Л. Машиностроение, 1981 – 272 с.
3. Пат. 2053373 Российская Федерация, МПК F 01 D 25/30 Выхлопная часть турбомашин [Текст] / Косяк Ю.Ф., Вирченко М.А., Галацан В.Н. [и др.], Заявитель и патентообладатель ОАО «Турбоатом». – №4649389; заявл. 13.02.89; опубл. 27.01.96., Бюл. №3. – 3 с.

Поступила в редакцию 5.05.2011

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДИФУЗОРІВ ВИХІДНИХ ПАТРУБКІВ ТУРБОМАШИН ЗІ СПЕЦІАЛЬНИМ ВДУВОМ ПОТОКУ

О.Ю. Юдин

Наведені результати розрахункових аеродинамічних досліджень двох осесимметричних осерадіальних дифузоров зі спеціальним вдувом потоку уздовж їх зовнішніх обводів, які характерні для вихідних патрубків сучасних парових турбін. У розрахункових моделях дифузоров імітувалася також надбандажний радіальний витік над робочим колесом. Аналізувалися такі характеристики: коефіцієнт імпульсу струменя вдуву потоку, коефіцієнти втрат дифузора - повних, внутрішніх і з вихідною швидкістю. Визначено оптимальні параметри спеціального вдуву і відзначено, що основний вплив до рівня повних втрат дифузора надає втрата з вихідною швидкістю, яка пов'язана з характером течії та наявністю відривних циркуляційних зон. Наведено порівняння результатів розрахункових та експериментальних досліджень.

Ключові слова: вихідний патрубок турбомашини, вдув потоку, коефіцієнти втрат, осесимметричний дифузор, коефіцієнт імпульсу струменя, циркуляційна зона.

INVESTIGATION OF AXISYMMETRIC DIFFUSERS EXHAUST MANIFOLDS OF TURBOMACHINES WITH SPECIAL INJECTION FLOW

A.Yu. Yudin

The calculation aerodynamic studies results of two axisymmetric axial-radial diffusers with a special injection flow along their outer contours are described. These diffusers exhaust manifolds design for modern steam turbines are typical. The shroud ring radial leakage over rotor blades in computational models of the diffusers is simulated. The following characteristics: the coefficient of the pulse jet injection flow, loss coefficients of the diffuser – the overall, internal and exit velocity are analyzed. The optimum parameters of a special injection are defined. The exit velocity loss on the level of overall losses of the diffuser has the main influence and depends from flow character and circulation zones separating is noted. The comparison of results between the calculated and experimental research is described.

Key words: exhaust manifolds of turbomachines, injection flow, loss coefficients, axisymmetric diffusers, the coefficient of the pulse flow, circulation zone.

Юдин Александр Юрьевич – канд. техн. наук, с.н.с. кафедры турбиностроения Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: alex78ua@yahoo.com.