

УДК 621.515

**Н.В. Калинин**, канд. техн. наук, доц.,  
**О.Н. Щербаков**, аспирант  
Сумский государственный университет

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В БЕЗЛОПАТОЧНОМ ДИФФУЗОРЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА**

*В статье представлены методика и результаты экспериментального исследования течения газа в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора на аэродинамическом стенде.*

**Ключевые слова:** центробежный компрессор, безлопаточный диффузор, отрыв потока, пограничный слой, экспериментальное исследование.

***Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.***

Значительная доля потребляемой в стране энергии приходится на привод центробежных компрессоров (ЦК), которые применяются во многих отраслях промышленности. Прямой путь снижения затрат на привод – повышение максимального КПД компрессоров, а также расширение зоны их устойчивой работы.

Экономичность работы, а также стоимость изготовления компрессора во многом зависит от конструкции диффузора, который обеспечивает преобразование кинетической энергии газа, выходящего из рабочего колеса (РК), в потенциальную энергию давления газа.

Наиболее простую конструкцию имеет безлопаточный диффузор (БЛД), использование которого обеспечивает небольшую динамическую нагрузку на ротор. Ступени с БЛД имеют широкую зону устойчивой работы и пологую характеристику КПД в области больших производительностей компрессора. Однако в области малых расходов экономичность БЛД обычно заметно ниже, чем лопаточного. Это вызвано, в первую очередь, возникновением обратных течений вследствие отрыва потока от боковых стенок. Кроме того, согласно [1] отрыв пограничного слоя, сопровождающийся не только появлением обратных токов, но и более сложными нестационарными явлениями, инициирует вращающийся срыв в ступени и определяет, таким образом, границу устойчивой работы.

Поэтому для расширения зоны устойчивой работы ЦК необходимо использовать методы управления отрывом потока.

Несмотря на существенные успехи в развитии расчетных методов и вычислительной техники, проектирование центробежных компрессоров, а также их дальнейшее совершенствование по-прежнему во многом базируются на экспериментальных исследованиях.

### *Анализ исследований и публикаций.*

Исследованиям течения газа в безлопаточном диффузоре посвящено большое количество работ. Наиболее подробно результаты исследований представлены в работах [2, 3, 4, 5, 6].

Экспериментальному исследованию влияния формы БЛД в меридиональной плоскости среднерасходных ступеней ЦК на эффективность преобразования энергии посвящена работа [2]. Проведено обширное экспериментальное исследование 18 вариантов ступеней концевой типа с БЛД, отличающихся формой в меридиональной плоскости, в сочетании с различными типами колес, при разных окружных скоростях  $U_2$ . Расчетно-теоретический анализ экспериментальных потерь в БЛД позволил автору этой работы сделать вывод, что течение газа в БЛД условно можно разбить на два участка: входной ( $r = r/r_2 < 1,2$ ) и основной ( $r = r/r_2 > 1,2$ ). На входном участке при  $b_3 < b_2$  главную роль играют потери смешения и трения, на основном - потери трения. Также в [2] было показано, что КПД и коэффициент потерь БЛД на основном участке не зависят от типа РК. Сужение диффузора по отношению к РК как на входном, так и на основном участке способствует лучшему согласованию оптимального режима работы диффузора с оптимальным режимом работы колеса. Наилучшие результаты по КПД имел профилированный диффузор, суженный на входном участке до значения ширины  $b \approx 0,8b_2$  и постоянной ширины на основном участке. По мнению автора [2], увеличение КПД достигалось за счет уменьшения потерь смешения, улучшения структуры потока и увеличения угла  $\alpha$  на входном участке БЛД.

Возможность возникновения отрыва пограничного слоя в БЛД, перемещения зон отрыва с одной стенки БЛД на противоположную на режимах малых расходов была доказана теоретически и экспериментально в работах [2, 3, 4, 5]. Теоретическая модель, разработанная в [6] на основе экспериментальных исследований, связывает возникновение вращающегося срыва с отрывом пограничного слоя на стенках БЛД. Однако, дальнейшие экспериментальные исследования [4] показали, что связь между отрывом пограничного слоя в БЛД и возникновением вращающегося срыва носит более сложный характер, а

теоретические методы расчета течения вязкого газа, основанные на полуэмпирических законах трения, могут привести к качественно различным результатам в зависимости от упрощающих допущений, принятых при анализе.

Несмотря на значительное число исследований, посвященных данной теме, приведенные в них результаты экспериментальных исследований отражают структуру потока недостаточно полно.

### ***Постановка задачи.***

Целью проведения экспериментального исследования являлось получение информации о структуре потока в БЛД, а также определение энергетических характеристик диффузора. Полученные экспериментальные данные предполагается использовать при разработке методики расчета, учитывающей неравномерность потока на входе в БЛД, а также для определения способа управления отрывом потока.

### ***Изложение материала и результаты.***

*Описание экспериментальной установки.* Исследования проводились на аэродинамическом стенде АД-400 НИК ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе». Схема стенда представлена на рисунке 1.

Стенд выполнен по открытой схеме, рабочей средой является воздух. Воздух, всасываемый из помещения через фильтр 1, по всасывающему трубопроводу 2 поступает в экспериментальную модель 3 и после сжатия через нагнетательный трубопровод 4 отводится за пределы помещения в атмосферу.

Ходовая часть стенда состоит из подшипников экспериментальной модели 5 и мультипликатора 6. Система электропривода стенда работает по схеме генератор-двигатель. В качестве приводного двигателя используется двигатель постоянного тока 7. Регулирование производительности стенда производится с помощью регулирующей заслонки 8, установленной в нагнетательном трубопроводе 4. Измерение расхода выполняется с помощью диафрагмы 9, которая установлена во всасывающем трубопроводе 2.

Объектом исследования в данной работе являлся безлопаточный диффузор с параллельными стенками высокорасходной концевой ступени. Схема диффузора показана на рисунке 2. Относительная ширина диффузора  $b_3/b_2 = 1,07$ .

Ступень выполнена с осевым подводом воздуха. При такой схеме не нарушается симметрия потока перед колесом.

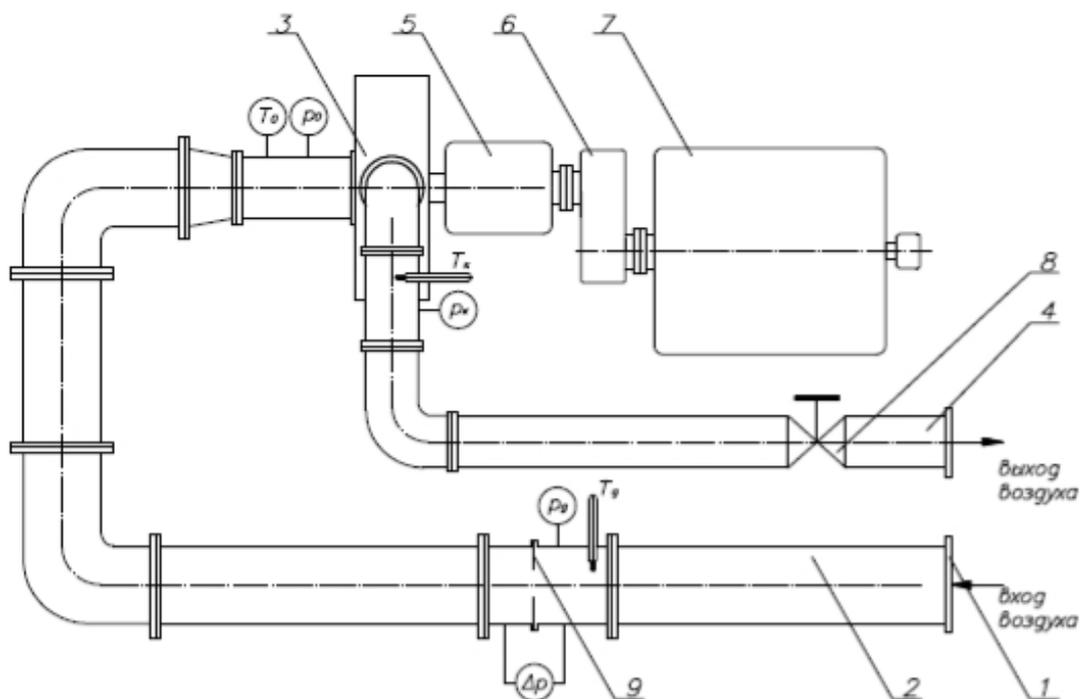


Рис. 1. – Схема аэродинамического стенда:

- 1 – фильтр; 2 – всасывающий трубопровод; 3 – экспериментальная модель; 4 – нагнетательный трубопровод; 5 – подшипники модели; 6 – мультипликатор; 7 – двигатель постоянного тока; 8 – заслонка; 9 – диафрагма

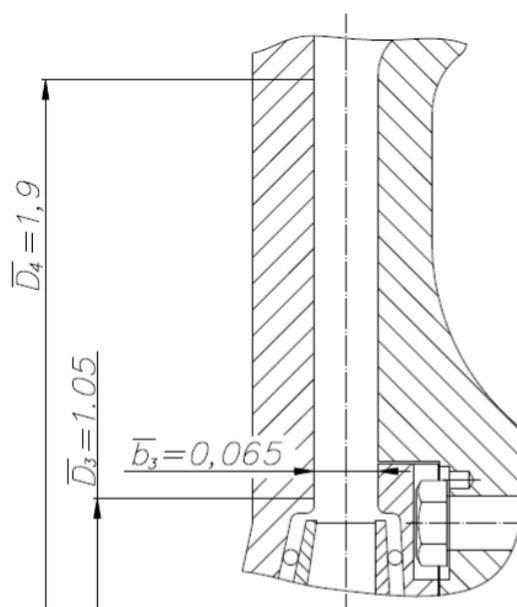


Рис. 2. – Конструктивная схема диффузора

*Измеряемые параметры и измерительная аппаратура.* Для получения газодинамических характеристик диффузора, а также для определения структуры потока в БЛД измерялись следующие параметры: температура газа на входе и выходе из диффузора; направление потока, полное и статическое давление вдоль радиуса БЛД; расход газа; давление и температура газа на входе в ступень.

Полное давление и направление потока в БЛД измерялись трехканальным аэродинамическим зондом, который с помощью импульсных трубок был соединен с U – образным манометром. Трехканальный зонд выполнен с диаметром носика 2,5 мм, приемными отверстиями диаметром 0,3 мм и углом между центральным и боковым отверстиями  $15^{\circ}$ . Для данной конструкции зонда угол нечувствительности к скосу потока для измерения полного давления -  $15^{\circ}$  [7]. Абсолютная погрешность измерения угла потока не превышает  $0,5^{\circ}$ .

Для измерения статического давления по радиусу на стенке диффузора были выполнены отверстия диаметром 1 мм. Регистрирующими приборами при измерении давлений потока являлись U-образные манометры, смонтированные на общем пьезометрическом щите.

Для измерения температуры на входе и выходе диффузора использовались термозонды с протоками с хромелькопелиевыми термомпарами.

Расход воздуха определялся с помощью диафрагмы, установленной во всасывающем трубопроводе. При этом измерялись: перепад давления на диафрагме, давление и температура воздуха перед диафрагмой для определения плотности. Для измерения температуры воздуха перед диафрагмой применялся ртутный термометр с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ , имеющий непосредственный контакт с потоком.

Температура воздуха во входном сечении измерялась термометрами сопротивления.

*Выбор схемы измерений и метода осреднения параметров потока.* Исследование проводилось в следующем порядке: обкатка, наладочные испытания, основные испытания.

В ходе наладочных испытаний было определено распределение статических давлений по окружности на выходе из диффузора, выявлено влияние выходного устройства на окружную симметрию потока (рис. 3).

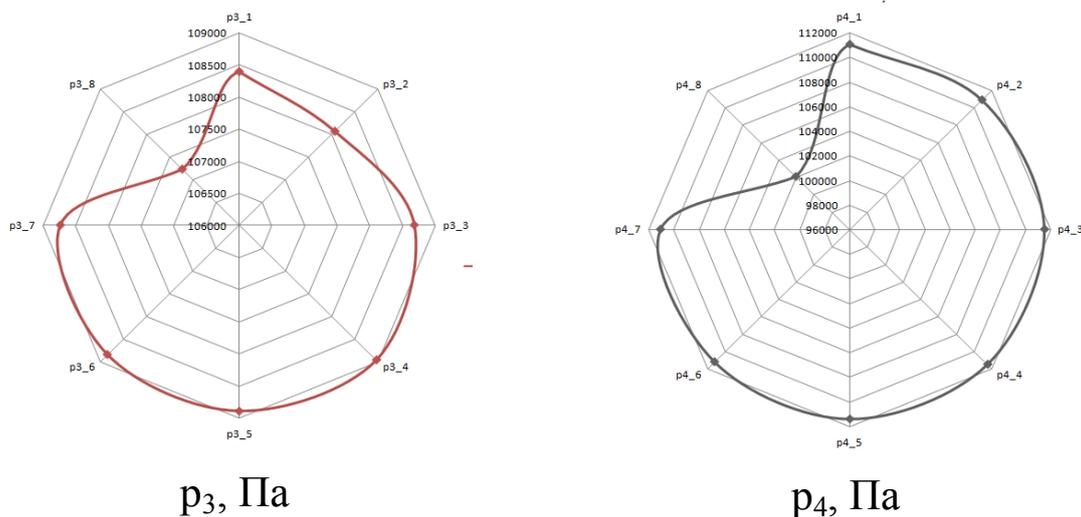


Рис. 3. – Распределение статических давлений по окружности на входе и выходе из диффузора: ( $\Phi_0=0,064$ )

На рисунке 4 представлена схема измерений, разработанная с учетом результатов наладочных испытаний.

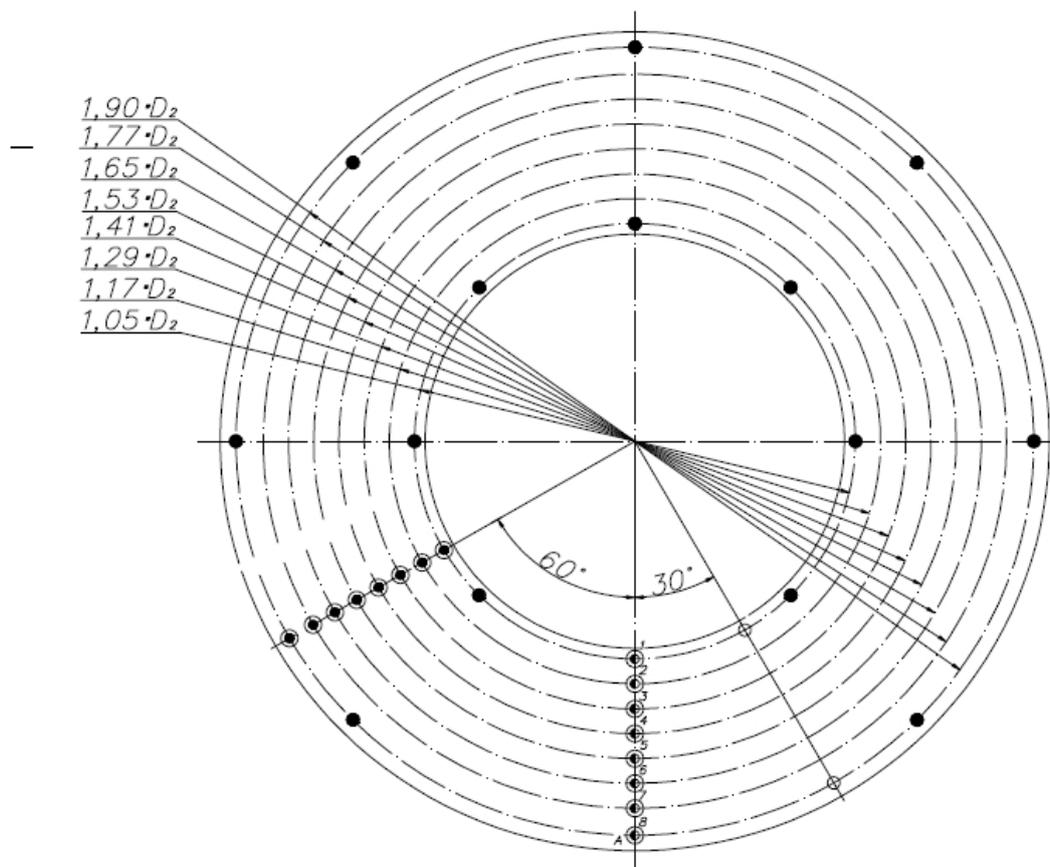


Рис. 4.  
Схема

измерений по радиусу БЛД:

⊙ – полное давление, ⊙ – статическое давление, ● – статическое давление (коллектор)

Для осреднения параметров использовалась методика, приведенная в [7]. Согласно этой методике средняя радиальная составляющая скорости определяется из условия равенства суммы расходов через все элементарные участки расходу через все сечение, подсчитанному по средней скорости:

$$\left(c_{r\text{cp}}\right)_{\bar{m}} = \frac{\Sigma c_r \cdot \Delta F}{F} = \frac{\bar{m}}{F \cdot \rho_{\text{cp}}}.$$

Окружная составляющая скорости определяется из условия равенства осредненного момента количества движения сумме элементарных моментов:

$$\left(c_{u\text{cp}}\right)_{\Gamma} = \frac{\Sigma(\Delta \bar{m} \cdot c_u)}{\bar{m}}.$$

Осредненное направление потока характеризуется углом

$$\left(\text{tg} \alpha_{\text{cp}}\right)_{\bar{m}} = \frac{\left(c_{r\text{cp}}\right)_{\bar{m}}}{\left(c_{u\text{cp}}\right)_{\Gamma}}.$$

Осредненная скорость находится по формуле

$$c_{\text{cp}} = \sqrt{\left(c_{r\text{cp}}\right)_{\bar{m}}^2 + \left(c_{u\text{cp}}\right)_{\Gamma}^2}.$$

Осредненная скорость для расчета динамического напора находится по формуле

$$\left(c_{\text{cp}}\right)_{\delta} = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta \bar{m} \cdot c^2)}{\bar{m}}}.$$

Осредненное полное давление находится по формуле

$$p_{\text{cp}}^* = \frac{\Sigma(\Delta \bar{m} \cdot p^*)}{\bar{m}}.$$

*Результаты экспериментального исследования.* Для оценки энергетической эффективности диффузора определялись коэффициенты потерь и восстановления статического давления:

$$\zeta = \frac{p_{\text{ex}}^* - p_{\text{вых}}^*}{p_{\text{ex}}^* - p_{\text{ex}}}$$

$$C_p = \frac{P_{\text{вих}} - P_{\text{вх}}}{P_{\text{вх}}^* - P_{\text{вх}}}.$$

Зависимости значений коэффициента потерь и коэффициента восстановления статического давления от угла потока на входе  $\alpha_3$  показаны на рисунке 5.

Как видно из графика, зависимость  $\zeta(\alpha_{3\text{ ср}})$  имеет минимум при угле  $\alpha_{3\text{ ср}} \approx 30^\circ$ . Этому же режиму соответствует и максимальное значение коэффициента восстановления статического давления  $C_p$ .

Для анализа характеристик диффузора были построены эпюры скоростей вдоль радиуса БЛД (рис. 6). На рисунке показаны распределения абсолютной, расходной и окружной составляющей скорости.

Режиму с наименьшим коэффициентом потерь  $\zeta$  (при  $\alpha_{3\text{ ср}} = 30^\circ$ ) соответствовали равномерные поля скоростей во входном участке – неоднородность полей углов не превышала при этом  $7^\circ$ . По мере удаления от колеса неоднородность потока по ширине канала не увеличивалась.

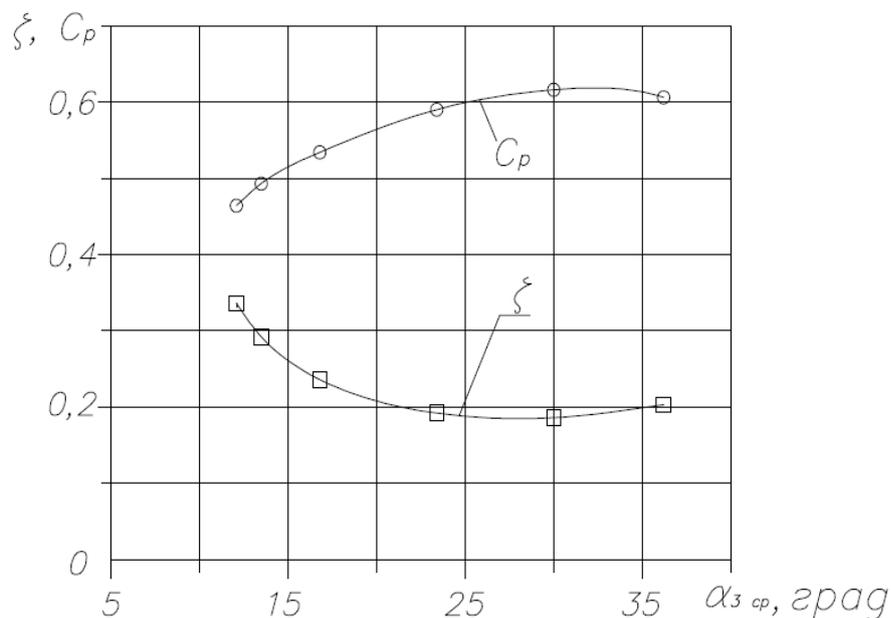


Рис. 5. – Характеристики диффузора:

$$M_{C3} \approx 0,21; Re_{U2} \approx 4,7 \cdot 10^6$$

При увеличении расхода ( $\alpha_{3\text{ ср}} = 36-45^\circ$ ) скорости у стенок на входе в диффузор, особенно окружная составляющая  $C_u$ , были несколько увеличены по сравнению с серединой канала. Видимо, это вызвано дополнительной передачей момента импульса потоку диска-

ми колеса за счет трения. Неоднородность углов потока  $\alpha$  по ширине на входном участке диффузора достигала  $10-18^\circ$ . По мере удаления от колеса, вследствие влияния сил вязкости, скорости у стенок уменьшались – поток выравнивался.

Можно предположить, что рост коэффициента потерь  $\zeta$  при  $\alpha_{3\text{ ср}} > 30^\circ$  связан с выравниванием первоначально неоднородных полей скоростей в диффузоре.

Уменьшение расхода ( $\alpha_{3\text{ ср}} = 15-30^\circ$ ) не приводило к заметной деформации полей скоростей на входном участке. Однако, по мере удаления от колеса в диффузоре начиналась перестройка потока. Наиболее существенно деформировались поля радиальной составляющей скорости; при  $\alpha_{3\text{ ср}} = 15-20^\circ$  (рис. 6, а) возникали зоны обратных радиальных токов. Отрыв потока возникал у той стенки, у которой углы потока  $\alpha$  были меньше.

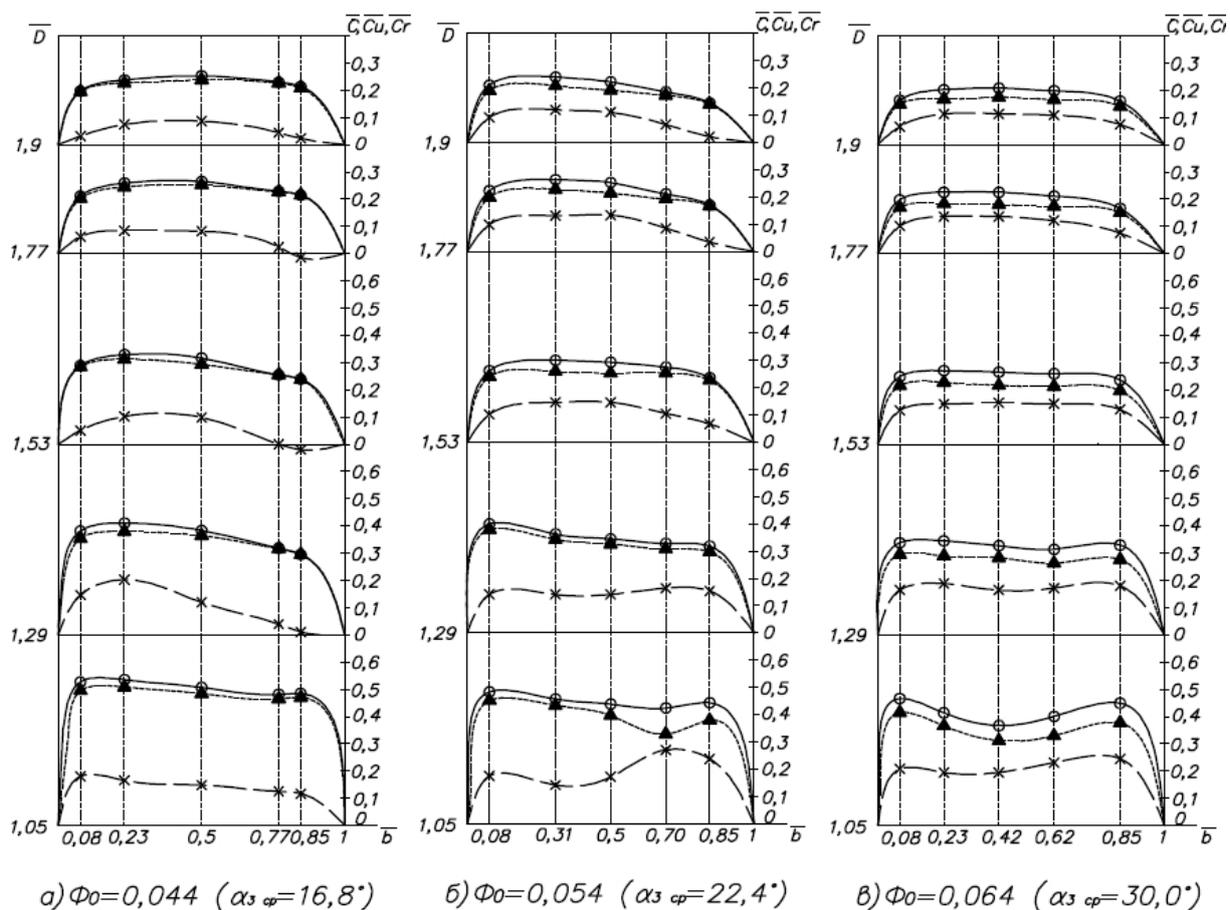


Рис. 6. – Поля скоростей в БЛД на различных режимах:

$$\text{---}\circ\text{---} \quad \bar{c} = \frac{c}{u_2}; \quad \text{---}\blacktriangle\text{---} \quad \bar{c}_u = \frac{c_u}{u_2}; \quad \text{---}\ast\text{---} \quad \bar{c}_r = \frac{c_r}{u_2}$$

Однако, при дальнейшем уменьшении расхода  $\alpha_3 < 15^\circ$ , отрыв потока зафиксирован не был. Зато наблюдался повышенный уровень шума, носивший пульсирующий характер, что дало основания предположить, что начиналось явление вращающегося срыва, для регистрации которого необходимо применять термоанемометры или малоинерционные датчики давления.

Также стоит отметить, что при уменьшении расхода возрастает напорность рабочего колеса, что приводит к увеличению окружной составляющей скорости на входе в диффузор. Поэтому, несмотря на уменьшение расходной составляющей, при малых расходах происходит увеличение абсолютного значения скорости, что в свою очередь приводит к увеличению потерь на трение.

Для анализа характера потерь было рассмотрено изменение полного давления вдоль радиуса диффузора (рис. 7).

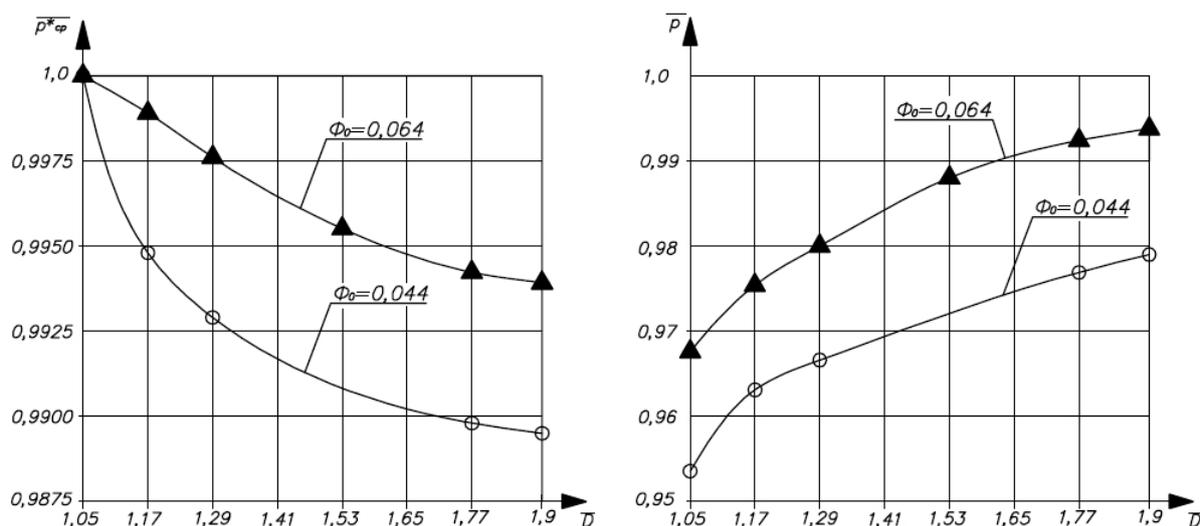


Рис. 7. – Изменение полного и статического давления вдоль радиуса диффузора:

$$\left( \overline{p_{cp}^*} = \frac{P_{cp}^*}{P_{3cp}^*}; \overline{p} = \frac{P}{P_{3cp}^*} \right)$$

Анализ изменения полного давления по длине диффузора показал, что зоны больших потерь энергии расположены во входном участке. Это вызвано, во-первых, тем, что скорость потока на входе в БЛД выше, а потому и больше потери на трение, во-вторых, потерями перемешивания. На основном же участке главную роль играют потери расширения и трения.

Кроме того, поскольку ширина диффузора несколько больше ширины лопаток рабочего колеса ( $b_3 = 1,07 \cdot b_2$ ) появляются дополнительные потери вследствие внезапного расширения струи за колесом. Работа диффузора при этом также ухудшается из-за увеличения неоднородности профиля скоростей по ширине БЛД на входном участке. Согласно [3], чем меньше  $\alpha_{3\text{cp}}$ , тем меньше сказывается внезапное расширение потока за колесом на характеристики диффузора.

### ***Выводы и направление дальнейших исследований.***

Проведенное экспериментальное исследование течения в БЛД позволяет сделать следующие выводы:

1. Течение в БЛД имеет сложный пространственный характер, симметрия потока отсутствует.

2. Существует режим течения, на котором значение коэффициента потерь  $\zeta$  наименьшее. Этому же режиму соответствует и максимальное значение коэффициента восстановления статического давления  $C_p$ . При больших расходах, т.е. при больших углах потока на входе в диффузор происходит рост значений коэффициента потерь  $\zeta$ , что связано с выравниванием первоначально неоднородных полей скоростей в диффузоре. При меньших расходах, т.е. при меньших значениях углов потока, в диффузоре по мере удаления от колеса начинается перестройка потока, возникают зоны обратных радиальных токов, и это приводит к увеличению потерь. При дальнейшем уменьшении расхода, возникает явление вращающегося срыва, что ведет к значительному повышению потерь и возникновению неустойчивости. Следует отметить, что увеличение потерь на трение при малых расходах происходит из-за увеличения скорости потока.

3. Анализ изменения полного давления по радиусу показывает, что зоны больших потерь энергии расположены на входном участке. Это вызвано потерями перемешивания неравномерного потока, выходящего из рабочего колеса, а также повышенным уровнем гидравлических потерь, вследствие более высоких значений скорости на входе в диффузор. По мере удаления от входа поток выравнивается, поэтому на основном участке БЛД преобладают потери на трение и расширение.

4. Для уменьшения коэффициента потерь при малых расходах и расширения зоны эффективной работы диффузора, необходимо

применять способы управления пограничным слоем, в частности использовать ступенчатые диффузоры и газодинамический вдув.

Список литературы

1. Измайлов Р.А. Определение числа срывных зон и скорости их перемещения при вращающемся срыве в центробежном компрессоре / Р.А. Измайлов, Нгуен Минь Хай // Компрессорная техника и пневматика. – 2006. – №7. – С. 20-23.
2. Нуждин А.С. Исследование безлопаточных диффузоров центробежных компрессоров [Текст] : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.С. Нуждин. – Л., 1969. – 21 с.
3. Ден Г.Н. Механика потока в центробежных компрессорах [Текст] / Г.Н. Ден. – Л. : Машиностроение, 1973. – 270 с.
4. Телевной А.А. Исследование нестационарных процессов в проточной части промежуточной ступени центробежного компрессора с безлопаточным диффузором: Дисс. ... канд. техн. наук / А.А. Телевной. – Л., 1975. – 263 с.
5. Senoo Y. Asymmetric flow in vaneless diffusers of centrifugal blowers / Senoo Y., Kinoshita Y., Ishida M. // ASME J. Fluids Eng. – 1977. – №99. – P. 104-114.
6. Jansen W. Steady fluid flow in a radial vaneless diffuser / Jansen W. // Journal of Basic Engineering. – 1964. – №86. – P. 607–619.
7. Галеркин Ю.Б. Методы исследования центробежных компрессорных машин [Текст] / Ю.Б. Галеркин, Ф.С. Рекстин. – Л.: Машиностроение, 1969. – 304 с.

Стаття надійшла до редколегії: 15.11.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б.Тарельник

**М.В. Калінкевич, О.М. Щербаков.** Експериментальне дослідження течії газу у безлопатковому дифузорі відцентрового компресора. У статті наведені методика та результати експериментального дослідження течії газу у безлопатковому дифузорі відцентрового компресора на аеродинамічному стенді.

**Ключові слова:** відцентровий компресор, безлопатковий дифузор, відрив потоку, примежовий шар, експериментальне дослідження.

**M. Kalinkevych. O. Shcherbakov.** Experimental Investigation of the Gas Flow in the Vaneless Diffuser of the Centrifugal Compressor. The technique and the results of the experimental investigation of gas flow in the vaneless diffuser of the centrifugal compressor at the aerodynamic test rig are presented in the paper.

**Keywords:** centrifugal compressor, vaneless diffuser, flow separation, boundary layer, experimental investigation.

© Калінкевич Н.В., Щербаков О.Н., 2011