

Автореферат
СЧЧ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СКОРИК АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ



УДК 621.515

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ПРОФИЛИРОВАНИЯ КАНАЛЬНЫХ
ДИФFUЗОРОВ С ЗАДАНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СКОРОСТЕЙ
ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

Специальность 05.05.14 – холодильная, вакуумная и компрессорная техника,
системы кондиционирования

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 2014

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре технической теплофизики Сумского государственного университета Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Калинкевич Николай Васильевич,
Сумский государственный университет,
доцент кафедры технической теплофизики.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Романовский Георгий Федорович,
заведующий кафедрой турбин
Национального университета кораблестроения
имени адмирала Макарова

кандидат технических наук, доцент
Буданов Василий Алексеевич,
декан факультета низкотемпературной техники и
технологии Института холода, криотехнологий и
экоэнергетики им. В.С. Мартыновского
Одесской национальной академии
пищевых технологий

Защита состоится «06» октября 2014 г. в 12:00 в ауд. 108 на заседании
специализированного ученого совета Д 41.088.03 в Одесской национальной
академии пищевых технологий по адресу: 65082, г. Одесса, ул. Дворянская, 1/3.

можно ознакомиться в библиотеке Одесской национальной
академии пищевых технологий по адресу: 65082, г. Одесса, ул. Дворянская, 1/3.

«06» октября 2014 г.

ПРО
ПРИЗНАЕТСЯ

ОДНОВИДНИЙ НА КО

підпис встановлюється

В.И. Милованов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В технологических схемах оборудования таких отраслей промышленности, как газовая, нефтяная и химическая, ключевое значение имеют центробежные компрессоры (ЦК), мощность которых может достигать десятков МВт. В частности, суммарная мощность компрессорных станций газотранспортной системы Украины составляет порядка 5 млн. кВт. Поэтому наиболее эффективное и рациональное использование энергии, затрачиваемой на привод ЦК, является стратегически важным направлением развития промышленности.

Широкое применение высоконапорные малорасходные ЦК получили в транспортной отрасли для наддува двигателей внутреннего сгорания автомобилей, судов, тепловозов. В связи с растущей потребностью уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу, снижение удельного полезного расхода топлива двигателями таких машин за счет повышения эффективности ЦК является также актуальной задачей.

Главным фактором, определяющим эффективность работы ЦК, является газодинамическое совершенство его проточной части. На долю диффузоров ЦК приходится примерно треть потерь и около половины роста давления во всем компрессоре. Выбор конкретного типа диффузора определяется условиями работы и назначением компрессора. Канальные диффузоры (КД) получили широкое применение в дозвуковых малорасходных ступенях, а также в околосзвуковых высоконапорных ступенях ЦК.

Открытые публикации по проектированию КД для дозвуковых течений датируются 60-ми годами прошлого века, а данные по исследованию КД для околосзвуковых течений ограничиваются, в основном, анализом структуры потока в них. При этом при их проектировании применяются зависимости, характерные для несжимаемого и невязкого газа, или экспериментальные данные, соответствующие течению в одиночных осесимметричных каналах. Поэтому создание методов проектирования КД, основанных на анализе закрученного течения сжимаемого газа с учетом эффектов вязкости в пограничном слое, является актуальной и практически важной задачей.

Связь работы с научными программами. Диссертационное исследование проводилось в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы кафедры технической теплофизики Сумского государственного университета (СумГУ) на тему «Исследование рабочих процессов энергетических машин» (№ 0110U004210), а также в соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ПАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе» (ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе»).

Цели и задачи исследования. Целью работы является создание универсального метода профилирования сегментов канальных диффузоров, основанного на решении обратной задачи газодинамики и обеспечивающего высокую эффективность преобразования кинетической энергии потока в потенциальную энергию давления.

Задачи исследования:

1. Создание математической модели для проекторочного расчета формы каналов (или сегментов) КД, позволяющей также выполнять вычисление распределений основных параметров потока вдоль каналов и определять положение точки отрыва потока.
2. Создание методики определения потерь в КД на нерасчетных режимах работы. Создание компьютерной программы для автоматизированного выполнения проектирования и расчетов КД средствами вычислительной техники.
3. Проведение численного исследования различных вариантов КД, спроектированных с использованием созданного метода, с целью изучения особенностей работы таких диффузоров и возможностей метода.
4. Проведение экспериментального исследования модели КД с целью подтверждения адекватности созданного метода профилирования, а также изучения особенностей течения газа в таком диффузоре.

Объект исследования – процесс течения газа в канальном диффузоре центробежного компрессора.

Предмет исследования – форма профиля сегментов канального диффузора.

Методы исследования: математическое моделирование; численное исследование течения газа в КД методами вычислительной гидрогазодинамики; экспериментальное исследование течения газа в КД центробежного компрессора на аэродинамическом стенде.

Создание математической модели для расчета параметров потока и геометрии КД выполнялось с использованием классических уравнений механики закрученного течения газа и полумпирических теорий пограничного слоя, точность которых подтверждается многочисленными опытами. При проведении численного исследования течения газа в КД соблюдались общепринятые в компрессорной практике требования к расчетной сетке и расчетным моделям течения. Экспериментальное исследование включает: выбор схемы и методики измерений в диффузоре, позволяющих получить наиболее полную картину течения с приемлемым уровнем громоздкости эксперимента; измерение параметров потока в каналах КД на различных режимах работы компрессора; обработку результатов измерений согласно принятой методике исследований.

Достоверность полученных научных положений и результатов исследования обеспечивается: достаточным согласованием расчетных и экспериментальных данных; применением методики измерений и оборудования, обеспечивающих допустимую погрешность экспериментального определения основных величин.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые создан метод профилирования канальных диффузоров ЦК, согласно которому геометрия каналов определяется из условия обеспечения предотрывного состояния пограничного слоя, что позволяет повысить эффективность диффузоров в сравнении с канальными диффузорами традиционной геометрии;
- впервые разработана методика определения потерь в канальных диффузорах на нерасчетных режимах работы, которая учитывает влияние косоугольного среза на распределение скоростей в диффузоре, что позволяет вычислять значения коэффициентов потерь с достаточной точностью;
- впервые получены распределения полных давлений в канале диффузора на различных режимах, на основании которых сделаны выводы о причинах и распределении потерь в канальном диффузоре.

Практическое значение полученных результатов:

- разработана компьютерная программа на основе предложенной математической модели, которая позволяет выполнять автоматизированное проектирование эффективных канальных диффузоров центробежных компрессоров для широкого диапазона исходных данных, определять потери в них, а также выполнять вычисление теоретического положения точки отрыва потока;
- на основании численного и экспериментального исследований предложены рекомендации касательно более эффективного проектирования и применения канальных диффузоров;
- получены экспериментальные данные о структуре потока в КД, которые позволяют корректировать расчетные модели течения в КД;
- результаты диссертационной работы в виде методик проектирования и расчета канальных диффузоров, а также компьютерной программы внедрены на промышленном предприятии ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» и в учебном процессе СумГУ, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах [1, 7] соискателем усовершенствована методика расчета течения в каналах турбокомпрессоров с учетом пограничного слоя. В работах [2, 4, 10, 11, 13] автор принимал участие при создании математической модели для профилирования канальных

диффузоров и выполнил проектирование КД для исследования на аэродинамическом стенде. В работах [3, 7, 8, 9, 12] соискателем выполнены численные расчеты и анализ течения газа в элементах проточной части ЦК. В работах [6, 8, 9, 14, 15] предложил методику экспериментального исследования диффузоров, провел испытания, выполнил обработку полученных данных, принимал участие при анализе результатов экспериментального исследования и сопоставлении их с теоретическими данными. Работа [5] выполнена самостоятельно.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всеукраинские научно-технические конференции молодых ученых и студентов «Состояние, достижения и перспективы холодильной техники и технологии» (г. Одесса, Украина, 2011 и 2013 гг.); Научно-технические конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов факультета технических систем и энергоэффективных технологий СумГУ «Современные технологии в промышленном производстве» (г. Сумы, Украина, 2011 и 2013 гг.); VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы холодильной техники и технологии» (г. Одесса, Украина, 2011 г.); XIII Международная конференция «HERVICON-2011», Международный форум «PUMPS-2011» (г. Сумы, Украина, 2011 г.); Конференция молодых ученых и студентов посвященная 90-летию Одесской государственной академии холода «Устойчивое развитие и штучный холод» (г. Одесса, Украина, 2012 г.); II Всеукраинская межвузовская научно-техническая конференция «Современные технологии в промышленном производстве» (г. Сумы, Украина, 2012 г.); Международная конференция 8th IIR International Conference on Compressors and Coolants «Compressors 2013» (Паперничка, Словацкая Республика, 2013 г.); Международная конференция 8th International Conference on Compressors and their Systems (г. Лондон, Великобритания, 2013 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 9 статьях, 5 из которых опубликованы в журналах, утвержденных положением МОН Украины, 1 – в зарубежном журнале, который входит в наукометрическую базу Scopus и 3 – в сборниках трудов международных конференций (из них 1 реферировается Scopus). Результаты диссертации дополнительно отражены в 6 тезисах докладов.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов и списка использованных источников. Полный объем работы составляет 156 страниц. Диссертационная работа содержит 78 рисунков, 10 из которых – на отдельных листах, 6 таблиц по тексту, список использованных источников из 98 наименований на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана связь работы с научными программами, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная ценность и практическое значение полученных результатов, приведена информация об апробации результатов исследования, публикациях по теме диссертации и личном вкладе соискателя.

В первом разделе приведен обзор научно-технических публикаций, связанных с проектированием и характеристиками канальных диффузоров ЦК. Отдельный подраздел посвящен данным по исследованию структуры потока в КД.

Анализ существующих подходов к проектированию КД показал, что в настоящее время проектирование КД производится с использованием данных по экспериментальному исследованию одиночных симметричных диффузоров с прямыми стенками с равномерным распределением параметров потока на входе, характер течения в которых не соответствует особенностям течения в ЦК. При проектировании КД не применялись методы, основанные на решении обратной задачи газодинамики и учитывающие особенности течения в ЦК. Значительное влияние на структуру потока в каналах КД имеет начальное состояние пограничного слоя, которое зависит от особенностей работы рабочего колеса и геометрии входного участка диффузора. Все это говорит о важности применения методов проектирования, учитывающих особенности вязкого закрученного течения.

На основании этого сформулированы основные цели и задачи диссертационного исследования.

Во втором разделе приведены основные положения метода профилирования сегментов канального диффузора из условия предотрывного состояния пограничного слоя на передней поверхности сегментов (рис.1). Представлена методика определения потерь в КД. Приводится пример использования метода для проектирования канального диффузора модельной ступени центробежного компрессора для экспериментального исследования на

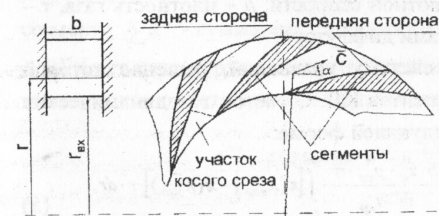


Рисунок 1 – Схема канального диффузора

аэродинамическом стенде. Также представлены результаты численного исследования различных вариантов канальных диффузоров, спроектированных согласно созданному методу.

При разработке метода профилирования принята физическая модель течения со

следующими допущениями: течение сжимаемого газа в каналах диффузора установившееся, адиабатное, безотрывное; распределение параметров потока на входе в диффузор равномерное; область течения в каналах диффузора условно разделена на невязкое ядро потока и вязкий пограничный слой, влияние которого учитывается при определении конечной геометрии сегментов.

Такая схема течения при использовании интегральных зависимостей для расчета параметров газа в ядре потока, а также полуэмпирических теорий для расчета пограничного слоя, позволит производить проектирование за достаточное короткое время без необходимости применения мощной компьютерной техники, а также громоздких программных комплексов.

Изменение момента импульса потока газа с массовым расходом \bar{m} на участке диффузора, начиная от входной кромки сегментов:

$$\Delta M = \bar{m} \cdot (r_{ax} \cdot c_{ax} \cdot \cos \alpha_{ax} - r \cdot c \cdot \cos \alpha), \quad (1)$$

где c_{ax} , α_{ax} – абсолютная скорость и средний угол потока у входной кромки; c , α – текущие значения абсолютной скорости и среднего угла потока.

Момент сил, действующих на z_c сегментов со стороны потока, относительно оси диффузора можно записать в следующем виде:

$$M = b \cdot z_c \cdot \int_{r_a}^r \Delta p \cdot r \cdot dr, \quad (2)$$

где $\Delta p = (p_{nep} - p_{зад})$ – разность давлений на передней и задней сторонах сегмента на радиусе r ; b – ширина диффузора.

Согласно теореме об изменении момента количества движения изменение момента импульса в уравнении (1) равно моменту внешних сил, действующих на поток со стороны сегментов на заданном участке, а следовательно уравнения (1) и (2) равны между собой:

$$\bar{m} \cdot (r_{ax} \cdot c_{ax} \cdot \cos \alpha_{ax} - r \cdot c \cdot \cos \alpha) = b \cdot z_c \cdot \int_{r_a}^r \Delta p \cdot r \cdot dr. \quad (3)$$

Уравнение неразрывности записывается в виде:

$$\bar{m} = c_r \cdot \rho \cdot 2\pi \cdot r \cdot b \cdot \tau, \quad (4)$$

где c_r – радиальная составляющая абсолютной скорости, ρ – плотность газа, τ – коэффициент стеснения потока сегментами диффузора.

Уравнения (3) и (4) составляют систему уравнений, решение которой позволит получить форму профиля сегментов КД. С учетом газодинамических функций она может быть записана в следующей форме:

$$\begin{cases} r_{ax} \cdot \lambda_{ax} \cdot \cos \alpha_{ax} - r \cdot \lambda \cdot \cos \alpha = \frac{b \cdot z_c \cdot p_{ax}^* \cdot \sigma}{\bar{m} \cdot a_{кр}} \cdot \int_{r_a}^r [\pi(\lambda_{nep}) - \pi(\lambda_{зад})] \cdot r \cdot dr, \\ \bar{m} = \lambda \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot a_{кр} \cdot \rho^* \cdot 2\pi \cdot r \cdot b \cdot \tau \cdot \sin \alpha, \end{cases} \quad (5)$$

где $\lambda = c/a_{кр}$ – коэффициент скорости; $a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*}$ – критическая скорость

звука; $\pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$, $\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$ – газодинамические

функции давления и плотности соответственно; $\sigma = 1 - (1 - \sigma_{вых}) \cdot \frac{r - r_{ax}}{r_{вых} - r_{ax}}$ –

функция диссипации полного давления, в которой $\sigma_{вых} = p_{вых}^* / p_{ax}^*$.

На передней поверхности сегментов задается закон изменения скорости для предотрывного состояния турбулентного пограничного слоя, полученный Калинкевичем Н.В. в следующем виде:

$$\lambda_{nep} = \lambda_1 \cdot \left[1 + \frac{(\bar{l} - \bar{l}_1) \cdot (2 + H_s) \cdot (-f_s)}{\bar{\delta}_1^{**}} \right]^{\frac{1}{2+H_s}}, \quad (6)$$

где H_s , f_s – формпараметры пограничного слоя, соответствующие точке возникновения отрыва; $\bar{l} = l/L$ – координата вдоль поверхности сегмента, отнесенная к длине средней линии сегмента; $\bar{\delta}^{**} = \delta^{**}/L$ – толщина потери импульса, отнесенная к длине средней линии сегмента. Параметры на некотором малом удалении от входной кромки, обозначенные индексом «1», выполняют роль коэффициентов, значения которых влияют на задаваемое распределение скорости количественно.

Также задается линейный закон изменения давления в окружном направлении в канале и линейный закон изменения среднего угла потока вдоль каналов $\alpha = f(r)$. Тогда в результате решения системы уравнений (5) определяется изменение средней скорости потока и коэффициента стеснения вдоль радиуса диффузора. Расчет производится с использованием численных методов.

Коэффициент стеснения потока задается в следующем виде:

$$\tau = 1 - \frac{\delta' \cdot z_c}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin \alpha}, \quad (7)$$

где $\delta' = \delta_c + \sum \delta^*$ – условная толщина сегмента (определяет толщину сегмента диффузора при условии обтекания его невязким потоком); δ_c – толщина сегмента, $\sum \delta^*$ – суммарная толщина вытеснения пограничных слоев в канале.

Расчет характерных толщин пограничного слоя на поверхностях сегментов выполняется с учетом распределений скоростей по методу Л.Г. Лойцянского:

$$\delta^{**} = 0,0159 \cdot \text{Re}^{-0,15} \cdot \lambda^{-3,55} \cdot \left(\int_0^L \lambda^4 dt \right)^{0,85}, \quad \delta^* = \delta^{**} \cdot H, \quad (8)$$

где значения формпараметра H принимаются от 1,1 для безотрывного течения до 2,8 для потока близкого к отрыву.

После расчета толщин вытеснения пограничных слоев в канале определяется толщина сегментов диффузора из формулы (7).

Конечным результатом проектировочного расчета является получение зависимости $\delta_c = f(r)$. Приняв угол наклона средней линии сегментов равным среднему углу потока ($\alpha_c = \alpha$), получаем полностью заданную форму сегментов КД.

Оценка отрыва потока на поверхностях сегментов производится при помощи формпараметра

$$f = \frac{\delta^{**}}{c} \cdot \frac{dc}{dl} \cdot \left(\frac{c \cdot \delta^{**}}{v} \right)^{1/6}. \quad (9)$$

Критерием отрыва является значение формпараметра $f_s = -0,02$.

Определение потерь в КД выполняется на основе расчета пограничного слоя, который производится с учетом распределений скоростей в диффузоре.

Коэффициент потерь полного давления в канале диффузора, обусловленных трением и перемешиванием потока, определяется по формуле

$$\zeta_k = \frac{\left(\sum \delta_{вых}^* \right)^2 + \frac{2 \cdot \sum \delta_{вых}^{**}}{W \cdot \sin \alpha_{вых}} \cdot \left(\frac{\sin \alpha_{вх}}{\sin \alpha_{вых}} \right)^2}{\left(1 - \frac{\sum \delta_{вых}^*}{W \cdot \sin \alpha_{вых}} \right)^2}, \quad (10)$$

где $\sum \delta_{вых}^*$ та $\sum \delta_{вых}^{**}$ - соответственно суммарные толщины вытеснения и потери импульса на задней и передней поверхностях сегмента на выходе из КД; W - окружное расстояние между передней и задней поверхностями сегментов на выходе из КД.

Потери полного давления, вызванные падением статического давления за выходными кромками конечной толщины (кромочные потери), определяются по формуле

$$\zeta_{кр} = -C_{р,кр} \cdot \frac{\delta_{с,вых}}{\left(W + \frac{\delta_{с,вых}}{\sin \alpha_{вых}} \right)}, \quad (11)$$

где $C_{р,кр} = \frac{P_{кр} - P_{я}}{0,5 \rho_{я} c^2}$ - коэффициент, который учитывает разницу давлений за выходной кромкой и в ядре потока; $\delta_{с,вых}$ - толщина выходной кромки. Значения коэффициента $C_{р,кр}$ принимаются в пределах $(-0,1; 0,25)$ с учетом экспериментальных данных.

Суммарные потери в диффузоре определяются следующим образом:

$$\zeta_{сум} = \zeta_k + \zeta_{кр}. \quad (12)$$

Методика расчета потерь в КД на нерасчетных режимах. На нерасчетных режимах работы характер распределений скоростей и уровень потерь в КД изменяются в сравнении с расчетным. Это обусловлено натеканием потока при углах атаки i_3 , отличных от 0° . Согласно с результатами экспериментального исследования КД (раздел 4), при положительных углах атаки отклонение потока (и рост давления) происходит главным образом на участке косоугольного среза, а при отрицательных - равномерно по всей длине диффузора. Такие особенности работы КД возможно учесть задавая изменение среднего угла потока вдоль каналов в соответствии с конкретным нерасчетным режимом.

При определении распределений скоростей в КД на нерасчетных режимах изменение среднего угла потока на участке косоугольного среза задается по формуле:

$$\alpha_{вх-кв} = \alpha_{вх} + (\alpha_{кв}^c - \alpha_{вх}) \cdot \frac{r_i - r_{вх}}{r_{кв} - r_{вх}}, \quad (13)$$

где $\alpha_{вх}$ - входной угол потока на данном режиме; $\alpha_{кв}^c$ - угол наклона средней линии сегментов на радиусе окончания участка косоугольного среза $r_{кв}$. Таким образом, согласно формуле (13) разница углов потока ($\alpha_{кв} - \alpha_{вх}$), а значит и повышение давления, на участке косоугольного среза при положительных углах атаки увеличивается относительно расчетного режима, а при отрицательных - уменьшается, что соответствует действительному характеру течения в КД.

На участке за косоугольным срезом углы потока принимаются равными соответствующим углам наклона средней линии сегментов.

Распределение углов потока (13) используется при определении средней скорости на нерасчетных режимах КД из уравнения неразрывности. Затем из уравнения (3) определяется разница давлений Δp на каждом r_i , позволяющая определить распределения скоростей вдоль поверхностей сегментов. Распределения скоростей далее используются для вычисления характерных толщин пограничного слоя по формулам (8), после чего определяются потери по формулам (10) - (12).

Численное исследование. В программном комплексе ANSYS CFX выполнен расчет различных вариантов КД, спроектированных с использованием предложенного метода. Это позволило установить преимущества таких диффузоров и особенности их работы.

Выполнено сравнение характеристик традиционного КД, спроектированного С. П. Лившицем, и КД, профиль которого получен с помощью предлагаемого метода. Диффузоры имеют одинаковые характерные геометрические размеры ($r_3 = 253$ мм, $r_4 = 358$ мм, $b_3 = b_4 = 20$ мм, начальная

толщина сегментов $\delta_{c,ax} = 7$ мм, $z_c = 14$, $\alpha_{ax} = 14^\circ$, $\alpha_{вых} = 44^\circ$) и различные профили сегментов (рис. 2а). Характеристики этих диффузоров, полученные в ANSYS CFX, приведены на рис. 2б.

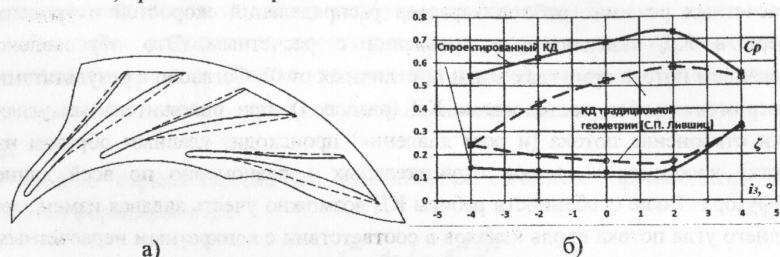


Рисунок 2 – Профили и характеристики КД традиционной геометрии (штриховая линия) и спроектированного с использованием представленного метода (сплошная линия)

Спроектированный КД более эффективен, чем традиционный, практически на всех режимах. На расчетном режиме ($i_3 = \alpha_{3c} - \alpha_3 = 0^\circ$) для этого диффузора значение коэффициента восстановления статического давления $C_p = \frac{P_{вых}^* - P_{ax}}{P_{ax}^* - P_{ax}}$

выше на 32%, коэффициента потерь полного давления $\zeta = \frac{P_{ax}^* - P_{вых}^*}{P_{ax}^* - P_{ax}}$ – ниже на

30%. При отрицательных углах атаки ($i_3 < 0^\circ$) потери в спроектированном КД меньше практически в 2 раза в сравнении с традиционным диффузором, при положительных – разница между значениями коэффициентов C_p и ζ для этих диффузоров менее значительна.

Форма распределения скоростей (6) обуславливает интенсивное торможение потока на начальном участке диффузора ($\bar{r}_i = \frac{r_i - r_{ax}}{r_{вых} - r_{ax}} = 0 \div 0,3$), поэтому толщина профиля сегментов на этом участке изменяется незначительно. Для обеспечения предотрывного состояния пограничного слоя далее по направлению потока происходит утолщение сегментов. Такой подход к профилированию обеспечивает более высокую (теоретически максимально возможную для заданных размеров меридионального контура) диффузорность каналов, чем традиционные подходы, что наглядно отображено на рис. 2. Однако увеличение диффузорности приводит к более раннему возникновению отрыва потока и росту потерь при $i_3 > 0^\circ$. В частности, в спроектированном КД потери стремительно возрастают при $i_3 = 4^\circ$.

Выполнено исследование влияния формы задаваемого распределения среднего угла потока вдоль каналов на характеристики КД. Квадратичный закон изменения угла потока задается в виде

$$\alpha = \alpha_{ax} + (\alpha_{вых} - \alpha_{ax}) \cdot \bar{r}_i - K \cdot (\bar{r}_i - \bar{r}_i^2), \quad (13)$$

где K – коэффициент, который влияет на форму квадратичной зависимости. При $K > 0$ кривая имеет вогнутую форму, а при $K < 0$ – выпуклую (рис. 3а).

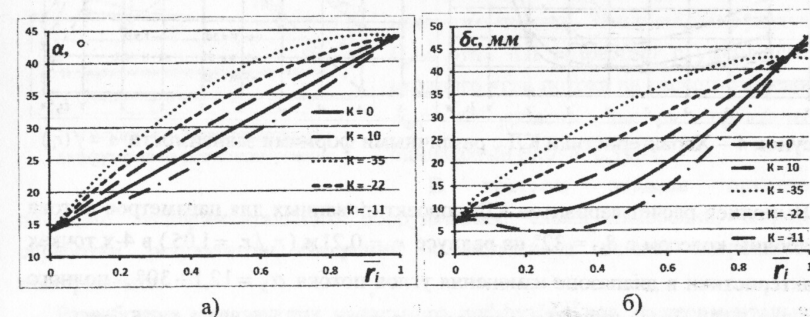


Рисунок 3 – Распределения среднего угла потока и толщины сегментов для различных вариантов КД

При $K > 0$ толщина сегментов на начальном участке уменьшается относительно толщины на входе (рис. 3б). Такие диффузоры не являются технологичными с точки зрения изготовления. Кроме того, характеристики такого диффузора хуже, чем у КД с линейным распределением ($K = 0$).

Диффузоры с $K < 0$ могут быть эффективнее КД с $K = 0$ при отрицательных углах атаки (рис. 4). В диффузоре, в котором график распределения углов имеет незначительную выпуклость ($K = -11$), на расчетном режиме величина коэффициента C_p выше на 6 % относительно КД с линейным распределением. При уменьшении угла атаки разница значений C_p для этих КД достигает 11 %. Потери в диффузоре с $K = -11$ меньше, чем в КД с $K = 0$, при $i_3 = -2^\circ$ на 5%, а при $i_3 = -4^\circ$ – на 8%.

Диффузор с $K = -22$ имеет пологую характеристику C_p , но также высокие потери на расчетном режиме и при $i_3 > 0^\circ$.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что выбор закона изменения среднего угла потока вдоль каналов следует выполнять с учетом режимов, при которых происходит основной период эксплуатации КД. При отсутствии подобных требований рационально применять КД с линейным распределением углов потока, поскольку в таком диффузоре обеспечивается

более устойчивая работа при положительных углах атаки, а при отрицательных - значения коэффициентов C_p и ζ отличаются незначительно от КД с $-22 < K < 0$.

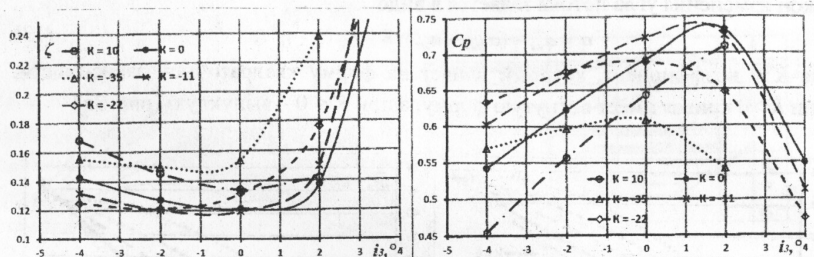
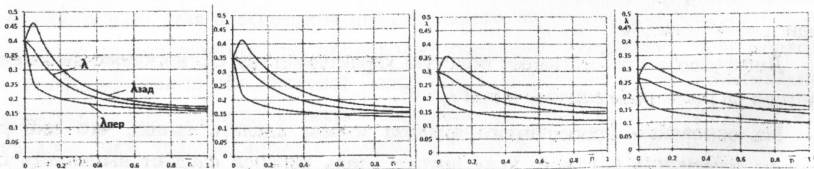


Рисунок 4 – Характеристики КД с различными формами зависимости $\alpha = f(\bar{r}_i)$

Выполнен расчет вариантов КД, спроектированных для параметров потока за рабочим колесом с $\beta_{n2} = 32^\circ$ на радиусе $r_3 = 0,21$ м ($r_3 / r_2 = 1,05$) в 4-х точках характеристики в диапазоне изменения углов потока $\alpha_3 = 12,1 \div 30^\circ$, полного давления $-p_3^* = 122 \div 113$ кПа, массового расхода $- \dot{m} = 0,882 \div 1,635$ кг/с.

Для каждого набора исходных данных спроектировано по 2 варианта КД, для которых применялись разные подходы к проектированию. В первом случае (диффузоры КД7_1, КД5_1, КД4_1, КД3_1) течение принималось невязким, во втором – учитывалось стеснение потока пограничным слоем (диффузоры КД7_2, КД5_2, КД4_2, КД3_2).

Используемые при проектировании диффузоров теоретические распределения скоростей представлены на рис. 5. При проектировании КД на более малые значения угла $\alpha_{вх}$, нагрузка на сегменты смещается ко входу в диффузор, что приводит к уменьшению толщины сегментов на этом участке. С увеличением $\alpha_{вх}$ нагрузка распределяется более равномерно по всей длине диффузора.



а) КД7_1 и КД7_2 б) КД5_1 и КД5_2 в) КД4_1 и КД4_2 г) КД3_1 и КД3_2

Рисунок 5 - Проектировочные распределения скоростей в каналах диффузоров вдоль относительного радиуса \bar{r}_i

Для каждого КД определены значения коэффициентов C_p и ζ на расчетном режиме (рис. 6).



Рисунок 6 – Характеристики диффузоров на расчетном режиме

Установлено, что эффективность диффузоров, спроектированных с учетом толщины вытеснения пограничного слоя, почти во всех случаях выше, чем у диффузоров, спроектированных для невязкого потока. Значение коэффициента C_p в этих КД возрастает с уменьшением входного угла потока на расчетном режиме $\alpha_{вх}$, а уровень потерь практически одинаковый ($0,078 \div 0,119$).

В третьем разделе приведены описание экспериментального оборудования, схема измерений, методика обработки результатов измерений и выполнена оценка погрешностей эксперимента.

Разработана конструкция канального диффузора для экспериментального исследования в составе модельной ступени ЦК на аэродинамическом стенде с целью апробации разработанного метода профилирования КД, а также для получения данных о структуре потока в таких диффузорах.

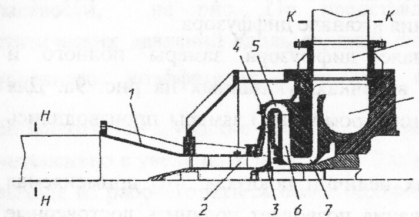


Рисунок 7- Схема экспериментальной установки

Установка включает в себя промежуточную ступень центробежного компрессора, состоящую из рабочего колеса 3, канального диффузора 4, поворотного колена 5, лопаточной решетки ОНА 6. Также в состав установки входят: конфузор 1, осевой подводящий канал кольцевого сечения 2, переводной канал 7, выходная сборная камера 8, нагнетательный патрубок 9.

Диффузор имеет следующие геометрические параметры: количество сегментов (каналов) $z_3 = z_c = 17$, диаметр входных кромок сегментов $D_3 = 524,4$ мм ($\bar{D}_3 = D_3 / D_2 = 1,14$), диаметр выходных кромок сегментов $D_4 = 618,4$ мм ($\bar{D}_4 = D_4 / D_2 = 1,344$), ширина диффузора $b_3 = 15,5$ мм ($\bar{b}_3 = b_3 / D_2 = 0,0337$), входной угол установки сегментов $\alpha_{c3} = 22^\circ$, выходной угол установки сегментов $\alpha_{c4} = 37^\circ$. В диффузоре выполнены отверстия для измерения статического давления на поверхностях сегментов и вдоль средней линии канала, а также

отверстия на стенке для траверсирования потока при помощи трубок полного давления вдоль поверхностей сегментов и средней линии (рис. 8).

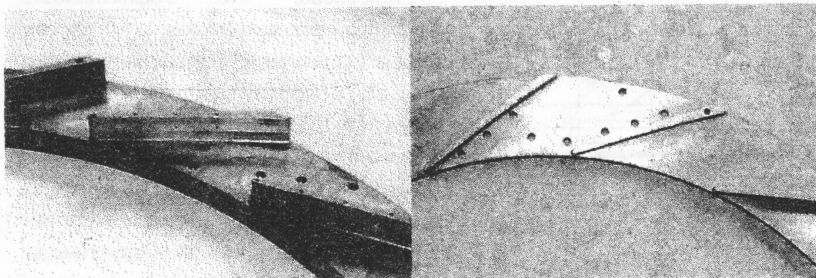


Рисунок 8 - Отверстия для измерения статического и полного давлений в КД

Выбранная схема размещения измерительных отверстий и приборов позволяет: получить распределения статических давлений на задней и передней поверхности сегментов; получить распределение статических давлений на средней линии канала; определить интегральные характеристики диффузора; получить распределение полного давления в канале диффузора.

Для определения потерь в канале диффузора замеры полного и статического давлений производились в точках, указанных на рис. 9а. Для определения суммарных потерь (с учетом кромочных) замеры производились по схеме на рис. 9б.

Оценка погрешностей вычисляемых величин показала, что применяемая методика экспериментального исследования позволяет получить достоверные результаты с достаточной для газодинамических исследований точностью. Относительная погрешность определения абсолютных статического и полного давлений не превышает 0,1 %, а относительная погрешность определения коэффициента потерь в диапазоне значений $\zeta = 0,04 \div 0,3$ составляет 2÷15 %.

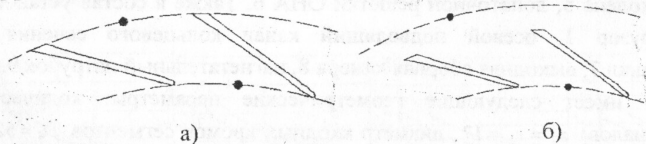


Рисунок 9 – Расположение точек измерения полного и статического давлений

В четвертом разделе приведены результаты экспериментального исследования спроектированного канального диффузора, а также выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Задаваемые при проектировании распределения давлений вдоль средней линии и вдоль поверхностей сегментов КД подтверждены экспериментально (рис. 10). Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями давлений в соответствующих точках не превышает 2 %.

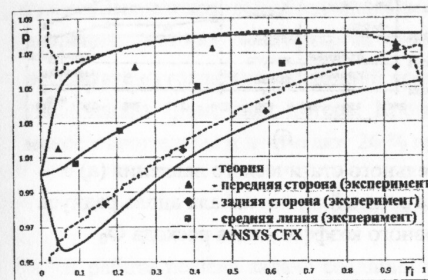


Рисунок 10 - Распределения относительных статических давлений вдоль поверхностей сегментов на расчетном режиме

Следовательно, представленный в работе метод позволяет выполнять профилирование сегментов КД с достаточной для инженерных расчетов точностью. При этом расчетные распределения давлений применимы для качественной и количественной оценки структуры потока в диффузоре, что важно на стадии проектирования.

Экспериментально получены распределения давлений в канале диффузора практически для всего диапазона режимов работы компрессора. В частности, на рис. 11а представлены распределения относительных статических давлений вдоль средней линии канала при различных значениях условного коэффициента расхода $\Phi_0 = \frac{4\pi}{\rho_0 \cdot u_2 \cdot \pi \cdot D_2^2}$. Рост давления на

безлопаточном участке перед входными кромками происходит более интенсивно с увеличением расхода. Это может быть связано с тем, что поток на выходе из рабочего колеса более однородный при больших расходах. Поэтому преобразование скоростного напора в давление происходит более эффективно при невысоком уровне потерь энергии, связанных с выравниванием потока.

На работу КД на нерасчетных режимах значительно влияет характер течения на участке косога среза и загромождение потока пограничным слоем на этом участке. С увеличением угла атаки в положительном направлении (то есть с уменьшением Φ_0 относительно Φ_{0p}) доля роста давления в косом срезе относительно суммарного повышения давления в КД более значительна. При отрицательных углах атаки рост давления происходит равномерно по всей длине КД. На участке косога среза при таких режимах давление растет не значительно, однако, за счет более тонкого пограничного слоя на начальном участке, дальнейшее торможение потока происходит более эффективно, чем при положительных углах атаки.

Отношение начального и конечного давлений в диффузоре также увеличивается по мере увеличения расхода. Рост давления за выходными кромками практически не происходит.

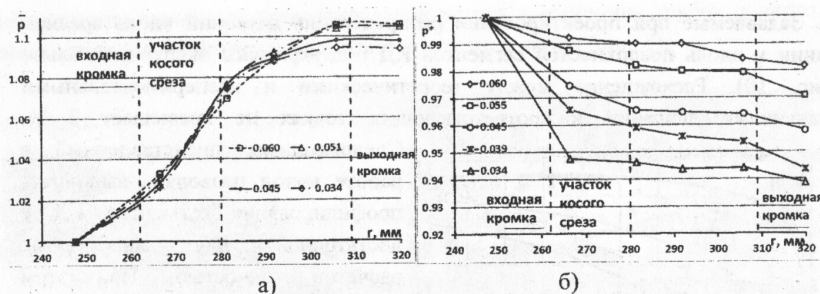


Рисунок 11 – Распределения относительного статического давления (а) и относительного полного давления (б) на средней линии канала вдоль радиуса КД для различных значений условного коэффициента расхода Φ_0

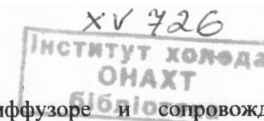
Значительное падение полного давления (на 1-5 %) происходит на безлопаточном участке перед диффузором, причем тем более значительно, чем меньше расход (рис. 11б). Это вызвано главным образом смещением «струй» и «следов», образующихся за рабочим колесом.

Падение полного давления в каналах диффузора не превышает 1 % практически для всех режимов работы компрессора, что говорит о высокой эффективности профилей сегментов. Увеличение потерь в КД происходит также за счет смещения «следов» за выходными кромками сегментов. Падение давления в результате этого в среднем для всех режимов составляет около 1 %.



Рисунок 12 – Характеристики потерь для различных участков КД

Экспериментальные и теоретические характеристики потерь, полученные для различных участков КД, представлены на рис. 12. Расхождение экспериментальных и теоретических значений коэффициентов потерь ζ_k , $\zeta_{\text{сум}}$ для всех режимов работы не превышает 15 %. Минимальный уровень потерь КД имеет на близком к расчетному режиме с $\Phi_{0p} \approx 0,047$. С уменьшением массового расхода $\Phi_0 < \Phi_{0p}$ потери возрастают более интенсивно, чем при увеличении. Это обусловлено тем, что на таких режимах торможение потока происходит с большим градиентом, что способствует утолщению пограничного слоя и возникновению отрыва потока. Также по данным экспериментального исследования на режимах с $\Phi_0 < \Phi_{0p}$ течение на выходе из рабочего колеса более неравномерное, чем при $\Phi_0 > \Phi_{0p}$, что приводит к тому, что



выравнивание потока продолжается в диффузоре и сопровождается дополнительными потерями.

Кромочные потери, обусловленные конечной толщиной выходных кромок сегментов, имеют существенное значение при $\Phi_0 < \Phi_{0p}$ и могут достигать 1/3 суммарных потерь в диффузоре. На этих режимах разрежение статического давления, которое учитывается коэффициентом $C_{p,kr}$, увеличивается в результате «утолщения» выходной кромки пограничным слоем, что приводит к увеличению кромочных потерь. Кромочные потери на режимах с $\Phi_0 > \Phi_{0p}$ менее значительны и достигают 26 % при $\Phi_0 \approx 0,056$.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе решена задача создания универсального метода профилирования канальных диффузоров центробежных компрессоров.

Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1. Экспериментально подтверждены распределения давлений, которые задаются при профилировании канальных диффузоров с использованием созданного метода. Расхождение экспериментальных и расчетных значений абсолютных статических давлений не превышает 2%.

Универсальность метода заключается в том, что математическая модель, заложенная в его основу, позволяет выполнять профилирование эффективных канальных диффузоров для широкого диапазона углов потока на входе в диффузор ($12 \div 30^\circ$), что подтверждается результатами численного и физического экспериментов.

2. Разработана методика определения потерь в канальных диффузорах, которая учитывает влияние косога среза на распределение скоростей в диффузоре на нерасчетных режимах. Расхождение экспериментальных и расчетных значений коэффициентов потерь не превышает 15 %.

3. Численное исследование течения газа в канальных диффузорах, спроектированных с использованием созданного метода, показало:

- применение предлагаемого метода профилирования позволяет уменьшить потери на расчетном режиме на 30 % и повысить значение коэффициента восстановления статического давления на 32% в сравнении с канальными диффузорами традиционной геометрии;

- в случае эксплуатации компрессора на расчетном режиме работы рекомендуется применение канальных диффузоров с линейным законом изменения угла наклона средней линии сегментов, поскольку в таком диффузоре обеспечивается минимальный уровень потерь и более устойчивая работа на расчетном режиме и при положительных углах атаки ($i_3 > 0^\circ$);

- диффузоры с квадратичными законами изменения угла наклона средней линии сегментов с незначительной выпуклостью ($-22 < K < 0$) более эффективны при отрицательных углах атаки ($i_3 < 0^\circ$) в сравнении с диффузорами с линейным законом изменения соответствующих углов;

- с уменьшением входного угла сегментов эффективность преобразования кинетической энергии потока в энергию давления на расчетном режиме увеличивается (то есть возрастает значение коэффициента C_p).

4. По результатам экспериментального исследования течения газа в канальном диффузоре установлено:

- характер распределений давлений в окружном направлении на участке канала вне выходного косоугольного среза близок к линейному, что говорит об адекватности данного допущения, принятого в математической модели.

- основная доля потерь приходится на безлопаточный участок между рабочим колесом и входными кромками диффузора (падение полного давления на этом участке составляет 1-5%, тогда как потери полного давления в каналах на всех режимах составляют 1%).

5. Проектирование канальных диффузоров с использованием предложенного метода позволит уменьшить радиальные габариты компрессора, поскольку задаваемые распределения скоростей соответствуют теоретически максимально возможному торможению потока для заданных размеров меридионального контура.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Калинкевич, Н.В. Проектирование радиально-осевых каналов турбокомпрессоров [Текст] / Н.В. Калинкевич, А.В. Скорик // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – №5 (127). – С. 20-25.
2. Калинкевич, Н.В. Методика проектирования и численное исследование канальных диффузоров центробежных компрессоров [Текст] / Н.В. Калинкевич, А.В. Скорик, В.Г. Паненко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 1(27). – С. 15-21.
3. Калинкевич, Н.В. Численное исследование течения газа в высокоэффективном канальном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н.В. Калинкевич, А.В. Скорик // Холодильна техніка і технологія. – 2012. – №4 (138). – С. 369-373.
4. Kalinkevych, M. Design Method for Channel Diffusers of Centrifugal Compressors [Electronic source] / M. Kalinkevych, A. Skoryk // International Journal of Rotating Machinery. – 2013. – V. 2013. – Article ID 589357, 7 p. – ISSN 1542-3034. – <http://www.hindawi.com/journals/ijrm/2013/589357>.
5. Скорик, А. В. Численное исследование течения газа в канальном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / А.В. Скорик // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2013. – № 4. – С. 36-46.

6. Калинкевич, Н.В. Экспериментальное исследование течения газа в канальном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н.В. Калинкевич, А.В. Скорик // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4(34). – С. 26-30.
7. Kalinkevych, M. Design and Flow Parameters Calculation of the Turbomachine Channels [Text] / M. Kalinkevych, O. Gusak, A. Skoryk, O. Shcherbakov // Proceedings of the XIIIth International Scientific and Engineering Conference "HERVICON-2011", International Forum "PUMPS-2011". – Sumy, 2011. – P. 275 – 285.
8. Kalinkevych, M. Investigation of the channel diffuser of centrifugal compressor [Text] / M. Kalinkevych, A. Skoryk // Proceedings of the 8th International IIR Conference on Compressors and Coolants «Compressors 2013»: 2-4 September 2013. – Papiernicka, Slovakia, 2013.
9. Kalinkevych, M. Flow and performance investigation of the specially designed channel diffuser of centrifugal compressor [Text] / M. Kalinkevych, A. Skoryk // Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and their Systems: 9-10 September 2013. – London, 2013. – P. 489 – 500.
10. Скорик, А.В. Методика проектирования канальных диффузоров центробежных компрессоров [Текст] / А. В. Скорик // Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів: тези доп. – Одеса, 2011. – С. 38.
11. Скорик, А.В. Методика проектирования и численное исследование канальных диффузоров центробежных компрессоров [Текст] / А. В. Скорик, Н. В. Калинкевич // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій: тези доп. – Суми, 2011. – Ч.3. – С. 25.
12. Калинкевич, Н.В. Численное исследование канальных диффузоров центробежных компрессоров [Текст] / Н. В. Калинкевич, А. В. Скорик // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції: тези доп. – Одеса, 2011. – С. 16-17.
13. Скорик, А.В. Методика проектирования высокоэффективных канальных диффузоров центробежных компрессоров [Текст] / А. В. Скорик, Н. В. Калинкевич // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції: тези доп. – Суми, 2012. – Ч.3. – С. 83.
14. Скорик, А.В. Канальный диффузор с высоким повышением давления для ступени центробежного компрессора [Текст] / А. В. Скорик, Н. В. Калинкевич // Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів: тези доп. – Одеса, 2013. – С. 103-104.
15. Калинкевич, Н.В. Канальный диффузор для ступени центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калинкевич, А. В. Скорик // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції

викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій: тези доп. – Суми, 2013. – Ч.2. – С. 32.

АНОТАЦІЯ

Скорик А.В. Універсальний метод профілювання каналних дифузорів із заданим розподілом швидкостей для відцентрових компресорів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. - Одеська національна академія харчових технологій. МОН України, Одеса, 2014.

Дисертаційна робота присвячена створенню методу профілювання каналних дифузорів відцентрових компресорів, який враховує особливості закрученої в'язкої течії і може використовуватися для широкого діапазону вихідних даних. Також створено методику визначення втрат в каналних дифузорах на нерозрахункових режимах.

Виконана апробація методу за допомогою числового і фізичного експерименту, яка підтвердила закладені в його основу теоретичні положення та можливість його застосування у промисловості. Отримано експериментальні дані про структуру потоку та втрати в каналному дифузорі на різних режимах роботи. Надані рекомендації щодо більш ефективного проектування каналних дифузорів.

Ключові слова: відцентровий компресор, каналний дифузор, метод профілювання, передвідливний стан примежового шару, числове дослідження, експериментальне дослідження

АННОТАЦИЯ

Скорик А.В. Универсальный метод профилирования каналных диффузоров с заданным распределением скоростей для центробежных компрессоров. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская национальная академия пищевых технологий. МОН Украины, Одесса, 2014.

Диссертационная работа посвящена созданию метода профилирования каналных диффузоров центробежных компрессоров, который учитывает особенности закрученного вязкого течения и применим для широкого диапазона исходных данных. Также создана методика определения потерь в каналных диффузорах на нерасчетных режимах, которая учитывает влияние косо́го среза на распределение скоростей в диффузоре, что позволяет вычислять потери с приемлемой точностью. Предложенная математическая модель для выполнения профилирования каналных диффузоров и методика расчета потерь реализованы в компьютерной программе.

Выполнена апробация метода при помощи численного и физического эксперимента, которая подтвердила заложенные в его основу теоретические положения и возможность его применения в промышленности. На основании

численного исследования показаны преимущества данного метода профилирования в сравнении с традиционными, а также предложены рекомендации для более эффективного проектирования каналных диффузоров. Полученные экспериментальные данные позволили расширить представление о структуре потока в каналных диффузорах на различных режимах работы центробежного компрессора, сделать выводы о распределении потерь в таких диффузорах и учитывались при создании методики расчета потерь.

Ключевые слова: центробежный компрессор, каналный диффузор, метод профилирования, предотрывное состояние пограничного слоя, численное исследование, экспериментальное исследование

SUMMARY

Skoryk A.V. The universal profiling method for channel diffusers with given velocity distribution for centrifugal compressors. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of engineering sciences in speciality 05.05.14 – refrigeration, vacuum and compressor equipment, air conditioning systems. – Odessa national academy of food technologies. MES of Ukraine, Odessa, 2014.

The thesis focuses on the creation of the channel diffusers profiling method for centrifugal compressors. Presented method takes into account features of the swirling viscous flow and is applicable for a wide range of initial conditions. Also the loss estimation technique for off-design conditions was created.

The numerical and experimental approbation of the method has been performed. It is shown that developed design method could be recommended for industrial application. Experimental data on the flow pattern and losses in the channel diffuser at off-design operating conditions has been obtained. The recommendations for effective channel diffuser design were stated.

Keywords: centrifugal compressor, channel diffuser, profiling method, preseparation condition of boundary layer, numerical investigation, experimental investigation

Підписано до друку 19.08.2014

Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Замовлення № 426

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3062 від 17.12.2007