

УДК 621.515

Исследование влияния пристеночного параметра y^+ на результаты численного моделирования конфузорного течения во входном устройстве центробежного компрессора

Л. В. ГИЛЕВА¹, А. А. АКСЕНОВ², канд. техн. наук Ю. В. КОЖУХОВ³,
А. Ю. ПЕТРОВ⁴

¹lyubov5reshet@gmail.com, ²aksenovaax@mail.ru,
³kozuhkhov_yv@mail.ru, ⁴alexander21school@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Эффективность компрессорных машин для холодильных установок характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД). Повышение КПД ступени необходимо для всех видов компрессорных машин. В работе проведено исследование входного радиального устройства центробежного компрессора, непосредственно оказывающее влияние на значение КПД ступени и компрессора в целом. Разработана математическая модель для проведения численного эксперимента. Для математической модели проведена валидация на натурном эксперименте. Разработка математической модели включала в себя исследование на сеточную независимость, подбор граничных условий и исследование влияния пристеночной функции y^+ для конкретной модели турбулентности. y^+ — важный параметр при проведении численных экспериментов, и его неправильный выбор может привести к тому, что картина потока будет нефизична. Существуют определенные рекомендации по значению y^+ для различных моделей турбулентности. Однако, как показало данное исследование, существующие рекомендации не универсальны для различных частей проточной части центробежных компрессоров. Исследованы и приведены рекомендации по значению параметра y^+ для входных устройств с различным значением степени конфузорности при различных значениях числа Рейнольдса. Для определения формы функции зависимости потерь от среднего значения y^+ результаты расчетов были сведены в отдельные графики и аппроксимированы отдельными функциями. Получена аппроксимационная зависимость по результатам численного эксперимента влияния среднего значения y^+ , степени конфузорности камеры и числа Рейнольдса на потери входного радиального устройства. Полученная зависимость была принята для определения оптимального значения y^+_{mean} и высоты первого пристеночного слоя для экспериментальных исследований камер. Результаты численного эксперимента сравнивались с результатами натурного эксперимента. Полученные результаты позволяют повысить точность CFD-моделирования и сократить время подготовки расчетной модели для входных радиальных устройств.

Ключевые слова: входное устройство, пристеночная функция, центробежный компрессор, численный эксперимент, разработка математической модели.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 14.01.2019, принята к печати 28.02.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-27-33

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Гилева Л. В., Аксенов А. А., Кожухов Ю. В., Петров А. Ю. Исследование влияния пристеночного параметра y^+ на результаты численного моделирования конфузорного течения во входном устройстве центробежного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С. 27–33.

The study of y^+ influence on the results of nozzle flow numerical simulation in the centrifugal compressor inlet chamber

L. V. GILEVA¹, A. A. AKSENOV², Ph. D. Yu. V. KOZHUKHOV³, A. Yu. PETROV⁴

¹lyubov5reshet@gmail.com, ²aksenovaax@mail.ru, ³kozuhkhov_yv@mail.ru, ⁴alexander21school@mail.ru

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

The efficiency of compressor machines for refrigeration needs is characterized by the efficiency coefficient. Increasing the efficiency of the stage is necessary, especially for centrifugal compressor machines. In this paper, the study of the centrifugal compressor inlet radial chamber, which directly affects the efficiency of the entire stage, is carried out. A mathematical model has been selected for conducting a numerical experiment with its subsequent validation with a full-scale experiment. The selection of the mathematical model included grid independence study, boundary conditions selection, and the study of the y^+ wall function influence for a specific turbulence model. y^+ is an important factor in numerical experiments, and its

incorrect choice can lead to a non-physical flow pattern. There are certain recommendations for the y^+ value for different turbulence models. However, as this study is shown, the existing recommendations are not universal for different centrifugal compressors flow parts. Recommendations on the value of the y^+ parameter for inlet chambers with different nozzle values at different Reynolds number values are investigated and given in this paper. To determine the losses dependence function form on the average y^+ value, the results of calculations are summarized in separate graphs and approximated by separate functions. Approximation dependence is obtained based on the numerical experiment results of the average y^+ value influence, the chamber nozzle coefficient and the Reynolds number on the losses of the inlet radial chamber. The obtained dependence was used to determine the optimal value of y^+_{mean} and the wall layer for experimental studies of chambers. The results of the numerical experiment are compared with the results of the full-scale experiment and experimental dependences are obtained. The results obtained will simplify further work on modeling the inlet radial chambers.

Keywords: inlet chamber, wall function, centrifugal compressor, numerical experiment, mathematical model selection.

Article info:

Received 14/01/2019, accepted 28/02/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-27-33

Article in Russian

For citation:

Gileva L. V., Aksenov A. A., Kozhukhov Yu. V., Petrov A. Yu. The study of y^+ influence on the results of nozzle flow numerical simulation in the centrifugal compressor inlet chamber. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 1. p. 27–33.

Введение

Компрессорные машины — неотъемлемая часть энергетических установок, используемых в нефтегазовой промышленности, холодильной технике и многих других отраслях. Эффективность компрессорных машин характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД). Повышение КПД ступени необходимо, в особенности для центробежных компрессорных машин. Сравнительно низкий КПД таких машин объясняется сложностью процессов, происходящих в проточной части. Для комплексного решения задач по повышению эффективности работы всей ступени необходимо рассматривать как подвижные части компрессора (рабочее колесо), так и неподвижные (диффузор, входное устройство, обратно-направляющий аппарат). В работе производится исследование входных радиальных устройств центробежного компрессора, которые оказывают значительное влияние на работу компрессорной ступени. При проектировании входных устройств для уменьшения потерь и неравномерности потока на входе в рабочее колесо компрессора важно тщательно исследовать поток в проточной части в целях повышения КПД ступени.

Постановка задачи

Целью работы является разработка математической модели для проведения численного эксперимента. Валидация математической модели является чрезвычайно важным этапом численного исследования т. к. необходимо удостовериться в том, что численный эксперимент соответствует натурному эксперименту. Задача моделирования включает в себя исследование на сеточную независимость, задание граничных условий и исследование влияния пристеночной функции y^+ для конкретной модели турбулентности.

Параметр пристеночного слоя y^+ — это безразмерное расстояние между стенками для ограниченного стенкой потока [1], которое можно определить с помощью формулы

$$y^+ = \frac{\tau_w y}{\nu} \quad (1)$$

где τ_w — скорость трения у ближайшей стенки, y — расстояние до ближайшей стенки; ν — локальная кинематическая вязкость жидкости.

При проведении численных экспериментов важную роль играет параметр y^+ и его неправильный выбор может привести к тому, что картина потока будет нефизична. Существуют определенные рекомендации по значению параметра y^+ для различных моделей турбулентности. Однако, как показало проведенное исследование, данные рекомендации не универсальны для различных частей проточной части центробежных компрессоров. Так, рекомендованное значение параметра y^+ для модели турбулентности SST (Shear Stress Transport) меньше 3, а для модели $k-\epsilon$ (k -epsilon) — от 30 до 300 [2].

Результаты численного эксперимента сравнивались с результатами натурного эксперимента и полученные экспериментальные зависимости, представлены далее в разделе «Результаты».

Экспериментальные данные

Многочисленные экспериментальные исследования входных устройств проводились в ряде научных организаций, таких как ЦАГИ, ЦКТИ, ЛМЗ, НЗЛ и др. В данной работе рассматривается натурный эксперимент, который был проведен на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» СПбПУ Никитиным А. А. [3]. В эксперименте исследовались 3 камеры разной степени конфузурности на воздухе. Входное устройство (рис. 1) состоит из следующих основных элементов:

1. Криволинейный осесимметричный конфузор с границами от выходного сечения камеры F_0 до цилиндрического сечения конфузора F_k с диаметром D_k (вход в конфузор из спирального канала); K_k — степень конфузурности осесимметричного конфузора.

2. Спиральная камера с границами от сечения F_k до сечения F_{180} (плоскость этого сечения располагается касательно к цилиндрическому сечению при $\Theta = 180^\circ$ и параллельно входному сечению камеры F_n ; K_c — степень конфузурности подводящего канала.

3. Подводящий канал, соединяющий спиральный канал со всасывающим трубопроводом, с границами от сечения F_{180} до сечения F_n ; K_n — степень конфузурности подводящего канала.

Степень конфузурности менялась в элементе осесимметричного конфузора. В элементах входной патрубок и спиральная камера степень конфузурности оставалась постоянной. Спиральная камера (состоит из 2-х половин) проектировалась по закону:

$$F_\varphi = \frac{F_0}{2} \cdot \frac{\varphi^\circ}{180^\circ}, \quad (2)$$

где $F_0 = 0,0201 \text{ м}^2$.

От сечения 180° до сечения 0–0 по методике постоянной площади. Входной патрубок представляет из себя на входе окружность диаметром 170 мм на выходе — переход в спиральную камеру. Сечение спиральной камеры — это прямоугольник с одним закругленным концом. Переход от спиральной камеры в патрубок — расширяющийся канала под 12° расширения от выхода из спиральной камеры до сечения 180 . Степень конфузурности изменяется в самом осесимметричном конфузуре и имеет параметры: $K_n = 0,6; 0,7; 0,8$.

В ходе натурального эксперимента были получены необходимые зависимости коэффициента сопротивления входного устройства от числа Рейнольдса $f(Re) = \zeta_c$. В работе [4] предлагается производить оценку входных устройств с помощью коэффициента сопротивления устройства, которое определяется формулой (3).

$$\zeta_c = \frac{\Delta p^*}{\rho_0 \frac{c_0^2}{2}}, \quad (3)$$

где $\Delta p^* = p_n^* - p_0^*$ — потери полного давления в устройстве, c_0 — скорость на входе в ступень для входного устройства.

Численное исследование

В ходе численного эксперимента сначала были построены 3D модели камер в программном комплексе Ansys CFX, используя подпрограмму Ansys Geometry. Степень конфузурности менялась путем изменения диаметра втулки на выходе из входного устройства (рис. 1). В камере была выполнена разделительная перегородка, у которой выходная кромка подрезана под углом к потоку (рис. 1)

Неструктурированная сетка построена в программном комплексе Ansys ICFM CFX, где варьировались такие сеточные параметры, как максимальный и минимальный размеры ячеек, масштабный коэффициент, количество пристеночных призматических слоев и размер первого пристеночного слоя, тем самым управляя значением пристеночного параметра y^+ . Исследование сеточной зависимости на размер ядра потока показало, что необходимо выбирать параметры сетки: масштабный коэффициент; максимальный размер ячейки сетки в ядре потока; максимальный размер первого пристеночного слоя. В результате, без учета призматического пристеночного слоя, размер сетки для исследованной камеры равнялся примерно 3,5 млн ячеек. Для 3-х видов 3D моделей входных устройств с различным значением степени конфу-

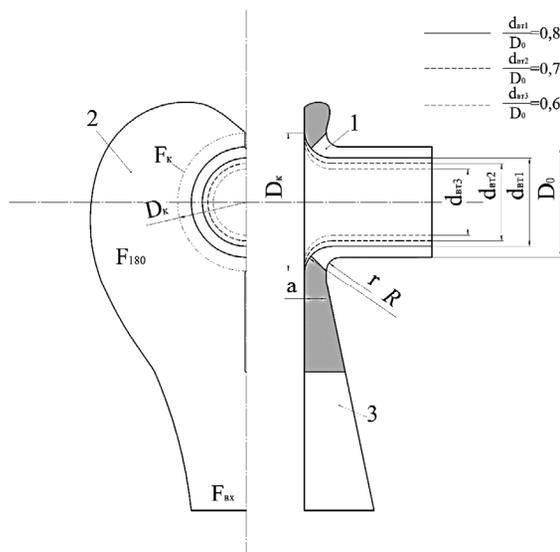


Рис. 1. Схема входного радиального устройства: 1 — криволинейный осесимметричный конфузор; 2 — спиральная камера; 3 — подводящий канал

Fig. 1. Scheme of the inlet chamber: 1 — curved axisymmetric nozzle; 2 — spiral chamber; 3 — supply channel

зурности на выходе из входного устройства, было построено по 6 сеток с различным размером пристеночного слоя, который варьировался от 0,01 до 0,0005 мм. Суммарно, для этого исследования, было построено 18 моделей сеток для 3-х геометрических моделей устройств.

Далее, в программном комплексе CFX-Pre были заданы граничные условия для проведения численного эксперимента. Модель турбулентности выбрана SST [5, 6]. На входе в камеру задавались полное давление и температура по полным параметрам, а на выходе — массовый расход. Массовый расход варьировался в зависимости от числа Рейнольдса в соответствии с натурным экспериментом на выходе из камеры. Расчет массового расхода при известном числе Рейнольдса проводился по формулам (4) и (5):

$$\bar{m} = c_0 \rho_0 F_0, \quad (4)$$

где c_0 — скорость в выходном сечении входного устройства;

ρ_0 — плотность газа в выходном сечении входного устройства;

F_0 — площадь проходного сечения на выходе из входного устройства.

Из известного значения числа Рейнольдса определяется значение скорости потока:

$$Re = \frac{c_0 D_{r.0} \rho_0}{\mu_0}, \quad (5)$$

где $D_{r.0}$ — гидравлический диаметр проходного сечения на выходе из входного устройства;

μ_0 — динамическая вязкость газа на выходе из входного устройства, которая для воздуха равна $18,1 \cdot 10^{-6}$.

Результатами экспериментального исследования в программном комплексе Ansys CFX являются: полное и статическое давление на входе и выходе из устройства,

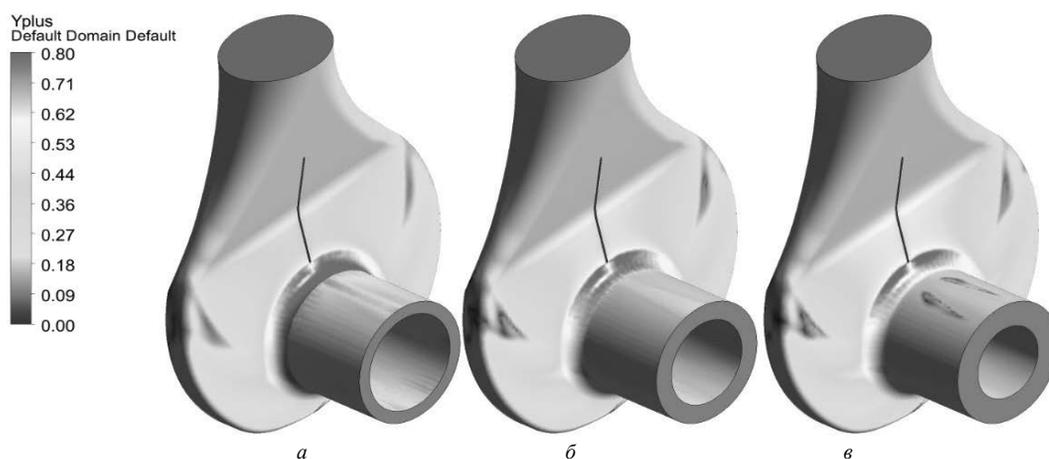


Рис. 2. Распределение параметра y^+ на стенке входного радиального устройства для трех различных степеней конфузности при равном пристеночном слое: а — $K_F=2,0$; б — $K_F=1,41$; в — $K_F=1,12$, где $K_F=F_{ax}/F_0$

Fig. 2. The y^+ parameter distribution on the wall of the inlet chamber for three different nozzle coefficients with an equal wall layer: а — $K_F=2,0$; б — $K_F=1,41$; в — $K_F=1,12$, where $K_F=F_{in}/F_0$

полная и статическая температура на входе и выходе, плотность газа на входе и выходе, скорость и массовый расход на входе и выходе из входного устройства. Аппроксимация параметров проводилась по площади, интегрированной по массовому расходу используя функцию massFlowAve. В натурном эксперименте проводились подобные замеры и обработка результатов по определенным точкам.

Результаты исследования

В результате исследования были получены данные и построены зависимости $f(Re)=\zeta_c$, в соответствии с экспериментальным исследованием [3] для разных значений степени конфузности. Исследование влияния пристеночного параметра y^+ проводилось для чисел Рейнольдса от $1 \cdot 10^5$ до $3,5 \cdot 10^5$.

Исследуемые численные модели проверены на влияние шероховатости. Данное исследование в статье не представлено, т. к. влияние песочной шероховатости на коэффициент потерь не наблюдалось. Шероховатость соответствовала 7-му классу или среднему арифметическому отклонению профиля $R_a=1$ мкм. Перевод шероховатости в песочную переводилось по методике [7, 8]. В связи с этим приведенные в статье расчеты проводились без учета шероховатости.

Для валидации численного исследования было принято решение исследовать параметр y^+ для трех различных степеней конфузности. Распределение параметра y^+ по стенкам камеры является не равномерным из-за нелинейного увеличения скорости по ходу течения и сложной структуры потока. Визуализация распределения параметра y^+ для трех различных конфузных течений представлена на рис. 2. Согласно картине распределения пристеночной функции, чтобы избежать влияния локальных всплесков на участке ассиметричного кольцевого конфузора [12], потери принято рассчитывать, как функцию от среднего интегрального значения параметра y^+ по площади [9]–[11]. Отношение среднего интегрального значения параметра y^+_{mean} к максимальному значению параметра y^+_{max} , при всех расчетах варьировалось от 0,35 до 0,45.

Для определения вида функции зависимости потерь от среднего значения параметра y^+ результаты расчетов были сведены в отдельные графики и аппроксимированы отдельными функциями, где $\zeta_c = f(y^+_{mean})$. Графики аппроксимации функции представлены на рис. 3–5.

Графики зависимостей, представленные на рисунках выше, имеют одинаковый вид. Функция зависимости потерь от параметра y^+ имеет вид:

$$\zeta_c = f(y^+_{mean}) = a + b(y^+)^{-2}. \quad (6)$$

Для получения зависимостей коэффициентов a и b от Re и K_F был проведен численный анализ влияния числа Рейнольдса и конфузности на форму полученной зависимости. Значение чисел Рейнольдса оказывает влияние в достаточно малых величинах, но было принято решение использовать его для формирования итоговой зависимости [13]–[15]. Степень конфузности оказывает гораздо большее влияние, что видно из рис. 6, и, так же будет использоваться в зависимости (7) для определения коэффициентов a и b .

После обработки полученных данных результатов численного эксперимента была получена аппроксимационная зависимость влияния среднего значения параметра y^+ , степени конфузности камеры и числа Рейнольдса на потери входного радиального устройства:

$$\zeta_c = f(y^+_{mean}, Re, K_F) = a + b(y^+)^{-2}, \quad (7)$$

где

$$a = (0,38 - 0,11 \cdot K_F) - (0,2 \cdot Re^2 \cdot K_F) / 10^{12};$$

$$b = (0,009 - 0,0015 \cdot K_F).$$

Полученная зависимость принята для определения оптимального значения параметра y^+_{mean} и пристеночного слоя для экспериментальных камер. На рис. 7 показано сравнение экспериментальных характеристик входного радиального устройства с результатами численного исследования при оптимальном значении параметра y^+_{mean} и пристеночном слое равном 0,001–0,002 мм.

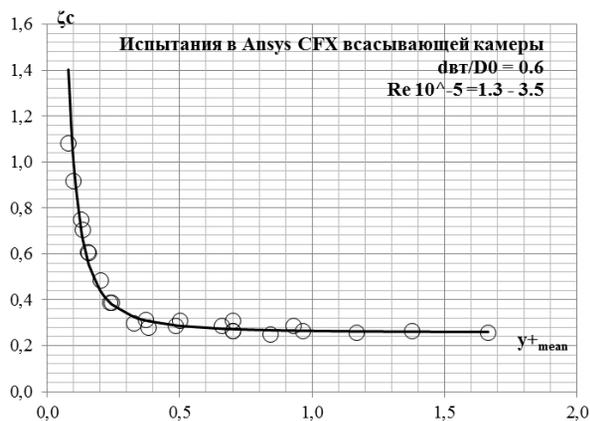


Рис. 3. Зависимости потерь от среднего значения параметра y^+ для $K_F=1,12$

Fig. 3. Loss dependencies on the average y^+ parameter value for $K_F=1.12$

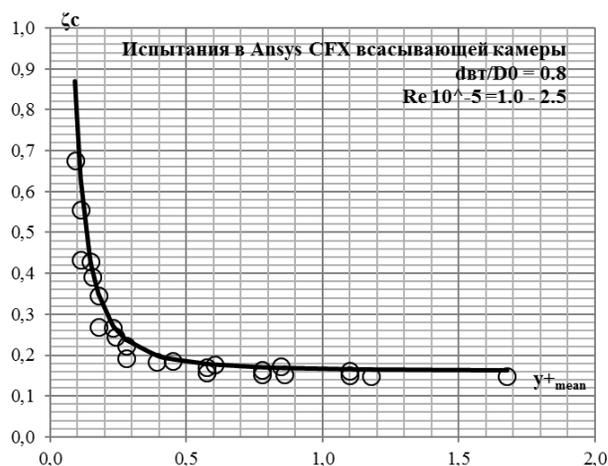


Рис. 4. Зависимости потерь от среднего значения параметра y^+ для $K_F=1,41$

Fig. 4. Loss dependencies on the average y^+ parameter value for $K_F=1.41$

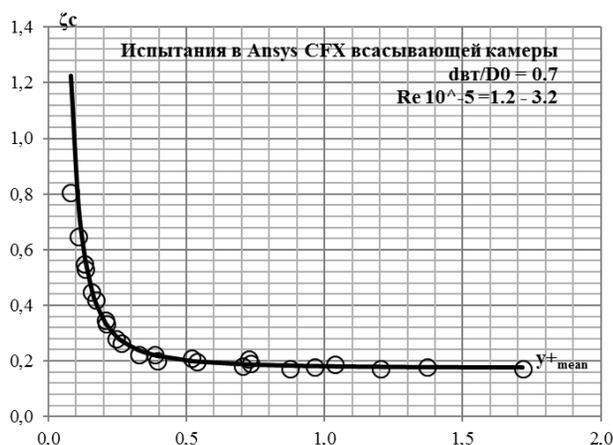


Рис. 5. Зависимости потерь от среднего значения параметра y^+ для $K_F=2,0$

Fig. 5. Loss dependencies on the average y^+ parameter value for $K_F=2.0$

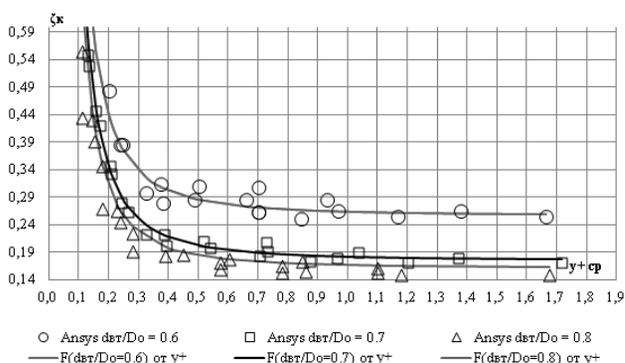


Рис. 6. Влияние степени конфузурности на форму зависимости потерь от среднего значения параметра y^+

Fig. 6. Influence of nozzle coefficient on the form of loss dependence depending on the average y^+ parameter value

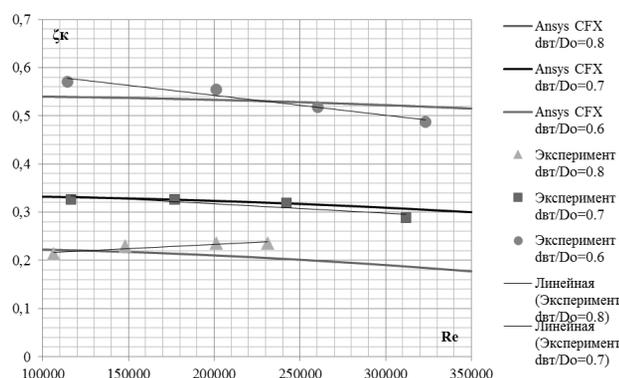


Рис. 7. Сравнение численного моделирования в Ansys CFX и экспериментальных данных исследования входного радиального устройства [3]

Fig. 7. Comparison of numerical simulation in Ansys CFX and experimental data of the inlet chamber [3]

Выводы

Полученная, в результате математического моделирования, зависимость (7) справедлива для входных радиальных устройств подобной формы проточной части. При сравнении численного и натурального экспериментов необходимо находить оптимальное значение параметра y^+_{mean} для разных значений степени конфузурности. Результатом исследования является зависимость, определяющая оптимальное значение пристеночного слоя численной модели входного радиального устройства, а, следовательно, и пристеночный параметр y^+ . Результаты исследования демонстрируют, что значение параметра y^+_{mean} для камер переменной степени конфузурности $K_F=1,1\div2,0$ находится в диапазоне параметра $y^+_{mean}=0,18\div0,25$ [15]–[20].

Полученные результаты позволяют повысить точность моделирования рабочего процесса в радиальных входных устройствах центробежных компрессоров и сократить время подготовки расчетной модели.

Литература

1. Данилишин А. М., Кожухов Ю. В., Гилева Л. В., Лебедев А. А. Верификация CFD-расчета на суперкомпьютере средне-расходных модельных ступеней. В сборнике: Суперкомпьютерные дни в России Труды международной конференции. 2016. С. 816–828.
2. Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V., Neverov V. V., Malev K. G., Mironov Y. R. The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station. AIP Conference Proceedings. Series: Oil and Gas Engineering, OGE 2017. 2017. pp. 020046. DOI:10.1063/1.4998866.
3. Никитин А. А. Исследование входных патрубков центробежных компрессоров. Автореферат к. т. н., Л., ЛПИ, 1965. 38 стр.
4. Aksenov A. A., Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V., Simonov A. M. Numerical simulation of gas-dynamic characteristics of the semi-open 3d impellers of the two-element centrifugal compressors stages. AIP Conference Proceedings. Series: Oil and Gas Engineering, OGE 2018. 2018. С. 030025. DOI:10.1063/1.5051886.
5. Neverov V. V., Kozhukhov Y. V., Yablokov A. M., Lebedev A. A. Optimization of a centrifugal compressor impeller using CFD: the choice of simulation model parameters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017. С. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/232/1/012037.
6. Чеглаков И. В., Кожухов Ю. В. Результаты моделирования пространственного течения в радиальном рабочем колесе центробежного компрессора с применением программного пакета Fine/Turbo. Материалы НПК с международным участием: Неделя науки СПбПУ. Институт энергетики и транспортных систем, 2014. С. 221–223.
7. Яблоков А. М., Кожухов Ю. В., Лебедев А. А. Исследование течения в малорасходной ступени центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики. // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2015. № 4 (231). С. 59–69.
8. Menter F. R. et al. A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables // Journal of Turbomachinery. 2006. 128 (3). DOI: 10.1115/1.2184352
9. Adams T., Grant Ch., Watson H. A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness. // International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics, 2012. Vol. 1, No. 1, p. 66–71, DOI: 10.1159/ijmem. 2012.008
10. Чембарисов Р. Р., Данилишин А. М., Лебедев А. А. Выбор и анализ оптимальной компоновки аппарата воздушного охлаждения для газоперекачивающего агрегата компрессорной станции природного газа. // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. ИЭиТС. Ч. 1. 2018. С. 224–227.
11. Милыев В. А., Данилишин А. М. Численное моделирование турбулентного течения в высоконапорном осерадиальном рабочем колесе центробежного компрессора // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. ИЭиТС. Ч. 1. 2018. С. 204–206.
12. Тобанев А. С. Организация систем производства и распределения сжатого воздуха на предприятиях или как делать не нужно. // Компрессорные технологии. 2019. № 2. С. 14–16.
13. Рахманина Л. А., Аксенов А. А. Исследование влияния неравномерного распределения абсолютной скорости потока на входе в осерадиальное рабочее колесо центробежного компрессора с применением методов численного модели-

References

1. Danilishin A. M., Kozhukhov Yu. V., Gileva L. V., Lebedev A. A. CFD-calculation on a supercomputer of medium-cost model stages. In the collection: Supercomputer days in Russia Proceedings of the international conference. 2016. Pp. 816–828. (in Russian)
2. Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V., Neverov V. V., Malev K. G., Mironov Y. R. The problem of validation of gas dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station. Materials of the AIP conference. Series: *Oil and gas engineering, OGE-2017*. 2017. Pp. 020046. DOI:10.1063/1.4998866.
3. Nikitin A. A. Investigation of inlet chambers of centrifugal compressors. Thesis PhD., Leningrad, 1965. (in Russian)
4. Aksenov A. A., Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V., Simonov A. M. Numerical simulation of gas-dynamic characteristics of semi-open three-dimensional impellers of two-element centrifugal compressor stages. Materials of the AIP conference. Series: *Oil and gas engineering, OGE-2018*. 2018. Pp. 030025. DOI:10.1063/1.5051886.
5. Neverov V. V., Kozhukhov Y. V., Yablokov A. M., Lebedev A. A. Optimization of the centrifugal compressor impeller using CFD: selection of simulation model parameters. IOP conference. Series: *Materials Science and engineering*. 2017. Pp. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/232/1/012037-YES.
6. Cheglakov I. V., Kozhukhov Y. V. Results of modeling of spatial flow in the radial impeller of a centrifugal compressor using the software package Numeca Fine/Turbo. Materials of scientific and practical conference with international participation: Week of Science SPbPU. Institute of transport systems and energy. 2014. Pp. 221–223. (in Russian)
7. Yablokov A. M., Kozhukhov Y. V., Lebedev A. A. Investigation of the flow in the low-flow stage of a centrifugal compressor by methods of computational gas dynamics. Scientific and technical sheets of SPbPU. 2015. No 4 (231). p. 59–69. (in Russian)
8. Menter F. R. et al. Correlation model of transition using local variables. *Journal of Turbomachinery*. 2006. 128 (3). DOI: 10.1115/1.2184352
9. Adams T., Grant Ch., Watson H. A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness. *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 2012. Vol. 1, No. 1, p. 66–71, DOI: 10.1159/ijmem. 2012.008
10. Chembarisov R. R., Danilishin A. M., Lebedev A. A. Selection and analysis of the optimal configuration of the air cooling apparatus for the gas pumping unit of the natural gas compressor station. SPbPU science week: proceedings of the scientific conference with international participation. IETS. Part 1. 2018. Pp. 224–227 (in Russian)
11. Milyaev V. A., Danilishin A. M. Numerical simulation of turbulent flow in a high-pressure axial impeller of a centrifugal compressor. Week of science SPbPU: proceedings of the scientific conference with international participation. IETS. 2018. Part 1. Pp. 204–206. (in Russian)
12. Tobanev A. S. The Organization of systems of production and distribution of compressed air at the enterprises or as it is not necessary to do. *Compressor technologies*. 2019. No. 2. Pp. 14–16. (in Russian)
13. Rachmanina L. A., Aksenov A. A. Investigation of the influence of the uneven distribution of the absolute flow rate at the entrance

- рования в Ansys CFX. // Компрессорные технологии. 2019. № 2. С. 18–25.
14. Бурдюгов С. И., Ерышкин Ю. П., Касьянов С. В., Макаров А. А. Опыт пусконаладочных работ многоступенчатых ЦБК с магнитным подвесом. // Компрессорные технологии. 2019. № 1, С. 12–17.
 15. Громов И. Н., Яблоков А. М. Моделирование вязкого течения в осерадиальном колесе и лопаточном диффузоре центробежного компрессора // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. ИЭиТС. Ч. 1. 2018. С. 204–206.
 16. Zeidan A. Turbulent shear flow recovery behind obstacles on smooth and rough surfaces, PhD thesis. Dept. Mech. Eng., University of Liverpool, UK, 1980.
 17. Baker T. J. Identification and Preservation of Surface Features, Proceedings, 13th International Meshing Roundtable, Williamsburg, VA, Sandia National Laboratories, September 19–22 2004, pp. 299–310.
 18. Mohd Ariff, Salim M. Salim and Siew Cheong Chean. Wall y+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: part 1 — low Reynolds number. // 7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 2009.
 19. Жлуктов С. В. Пристеночные функции для высокорейнольдсовых расчетов в программном комплексе Flow-Vision. // Компьютерные исследования и моделирование. 2015 Т. 7 № 6. С. 1221–1239.
 20. Knopp T. On grid-independence of RANS predictions for aerodynamic flows using model-consistent universal wall-functions // European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD. 2006.
 - to the axial impeller of a centrifugal compressor using numerical modeling methods in ANSYS CFX. *Compressor technologies*. 2019. No 2. Pp. 18–25. (in Russian)
 14. Burdugov S. I., Eryshkin Yu. P., Kasyanov S. V., Makarov A. A. Experience of commissioning of multi-stage CBC with magnetic suspension. *Compressor technologies*. 2019. No. 1. Pp. 12–17. (in Russian)
 15. Gromov I. N., Yablokov A. M. Modeling of viscous flow in the axial wheel and spade diffuser of a centrifugal compressor. Week of science Spbpu: proceedings of the scientific conference with international participation, IEITS. Part 1. 2018. Pp. 204–206. (in Russian)
 16. Zeidan A. Restoration of turbulent shear flow behind obstacles on smooth and rough surfaces, PhD thesis. Department. Mechanic. Ang., University of Liverpool, UK, 1980.
 17. Baker T. J. Identification and preservation of surface features, proceedings of the 13th international grid round table, Williamsburg, Virginia, Sandia National Laboratories, September 19–22, 2004. pp. 299–310.
 18. Mohd Ariff, Salim M. Salim and Siew Cheong Chean. Wall y+ approach for working with turbulent flow over a surface-mounted cube: part 1-low Reynolds number. *7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne, Australia 2009.
 19. Zhluktov S. V. Wall functions for high-Reynolds calculations in the FlowVision software package. *Computer research and modeling*. 2015. Vol. 7. No 6. Pp. 1221–1239. (in Russian)
 20. Knopp T. On grid-independence of RANS predictions for aerodynamic flows using model-consistent universal wall-functions. *European conference on computational fluid dynamics ECCOMAS CFD*. 2006.

Сведения об авторах

Гилева Любовь Васильевна

Аспирант, ассистент высшей школы энергетического машиностроения Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, lyubov5reshet@gmail.com

Аксенов Алексей Александрович

Ассистент высшей школы энергетического машиностроения Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, aksenovaax@mail.ru

Кожухов Юрий Владимирович

К. т. н., доцент высшей школы энергетического машиностроения Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, kozhukhov_yv@mail.ru.
SPIN-код: 5756–4994. Scopus Author ID: 56829504700. ORCID: 0000-0001-7679-9419. Web of Science Researcher ID: N-9066–2016

Петров Александр Юрьевич

Специалист, студент высшей школы энергетического машиностроения Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, alexsander21school@mail.ru

Information about authors

Gileva Lyubov V.

Graduate student, assistant professor of the Higher school of Power Engineering of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia, lyubov5reshet@gmail.com

Aksenov Aleksey A.

Assistant professor of the Higher school of Power Engineering of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia, aksenovaax@mail.ru

Kozhukhov Yuri V.

Ph. D., associate professor of the Higher school of Power Engineering of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia, kozhukhov_yv@mail.ru. Scopus Author ID: 56829504700. ORCID: 0000-0001-7679-9419. Web of Science Researcher ID: N-9066–2016

Petrov Aleksander Y.

Specialist, student of the Higher school of Power Engineering of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia, alexsander21school@mail.ru