

УДК 621.515

**КАК ССЫЛАТЬСЯ НА СТАТЬЮ / HOW TO CITE:**

**Карташов С.В., Кожухов Ю.В., Выбор сеточной модели и оценка влияния измерительных приборов в задачах моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежного компрессора, Журнал: Холодильная техника. №3. 2020. Издательский дом «Холодильная техника». С. 18 – 23.**

**Kartashov S.V., Kozhukhov YU.V., Vybora setochnoj modeli i ocenka vliyaniya izmeritel'nyh priborov v zadachah modelirovaniya vyazkogo potoka v maloraskhodnyh stupenyah centrobezhnogo kompressora, Zhurnal: Holodil'naya tekhnika. №3. 2020. Izdatel'skij dom «Holodil'naya tekhnika». S. 18 – 23.**

**Выбор сеточной модели и оценка влияния измерительных приборов в задачах моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежного компрессора**

**С.В. КАРТАШОВ**, sergey.v.kartashov@gmail.com; канд. техн. наук **Ю.В. КОЖУХОВ**, kozhukhov\_yv@mail.ru. ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого

**S.V. KARTASHOV**, sergey.v.kartashov@gmail.com; PhD **Yu.V. KOZHUKHOV** kozhukhov\_yv@mail.ru. FGAOU VO Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

В работе рассматривается вопрос выбора сеточной модели и оценка влияния измерительных приборов, расположенных в проточной части (ПЧ) при численном моделировании (RANS-подход) вязкого потока газа в малорасходной ступени центробежного компрессора с условным коэффициентом расхода  $\Phi=0,008$  в программном комплексе Numeca Fine/Turbo. Проведена оценка влияния измерительных приборов - трубок полного давления, расположенных в 3 сечениях по диаметру диффузора. Сделан вывод о незначительном влиянии измерительных приборов по сравнению с другими видами потерь в малорасходной ступени центробежного компрессора. Рассмотрен вопрос сеточной независимости решения расчетной модели в рабочем тракте ступени и притрактных областях. Показано, что обеспечение сеточной независимости решения в притрактных областях малорасходной ступени важно не менее, чем в лопаточных аппаратах проточной части. Оценено влияние безразмерного расстояния первого пристеночного слоя  $y^+$  при использовании низкорейнольдсово́й модели турбулентности Spalart-Allmaras.

**Ключевые слова:** Центробежный компрессор, малорасходная ступень, вычислительная газодинамика, измерительные приборы, сеточная модель, лабиринтные уплотнения, сеточная независимость, Numeca Fine/Turbo, модель турбулентности Spalart-Allmaras.

The paper presents the issue of choosing a mesh model and assessing the influence of measuring instruments located in the flow part with computational fluid dynamics (CFD) RANS-method of a viscous gas on a low-flow centrifugal compressor stage in the Numeca Fine / Turbo software package. The conditional flow coefficient  $\Phi$  of investigated stage is 0,008. The influence of total pressure measuring tools placed in three section along the diameter is evaluated. It is concluded that the measuring tools have a minor effect compared to the other types and sources of low-flow stage losses. The task of flow path and cavities mesh independence is considered. The cavities mesh independence is important not less than the main flow path and blade rows in flow part. The influence of the dimensionless wall distance  $y^+$  of the first near-wall layer for low-Reynolds turbulence model Spalart-Allmaras is estimated.

**Keywords:** Centrifugal compressor, low-flow stage, computational fluid dynamics, measuring tools, mesh model, labyrinth seals, mesh independence, Numeca Fine/Turbo, Spalart-Allmaras turbulence model.

### **Введение**

Применение прикладных пакетов программ по численному моделированию вязкого течения в проточной части центробежных компрессоров позволяет предприятиям-изготовителям получать прогнозируемые характеристики работы машин при отсутствии аналогичных введенных в эксплуатацию компрессоров. Наряду с этим доступна возможность исследовать характер течения в отдельных элементах проточной части компрессора с целью уточнения значений гидравлических потерь и улучшения обводов исследуемых элементов [1-3]. В научных исследованиях течения газа в проточной части центробежных компрессоров расчеты методами вычислительной газодинамики являются, за редким исключением, одним из необходимых этапов [4, 5]. Методы вычислительной гидрогазодинамики (Computation fluid dynamic - CFD) имеют особенности и ряд ограничений в постановке и решении задач и поэтому соответствующие программные продукты не могут рассматриваться как простой, интуитивно понятный инструмент с одинаковыми подходами в решении различных задач [6, 7]. Применение единого подхода без учета особенностей решаемой задачи при использовании CFD-методов не гарантирует достоверного результата. Так же при постановке и решении задачи моделирования

необходимо стремиться к уменьшению трудозатрат и ресурсоемкости этих процессов без потери в качестве решения

Моделирование течения в малорасходной центробежной компрессорной ступени проведено в программном комплексе Numeca Fine/Turbo. Исследуется этап создания сеточной модели малорасходных ступеней с условными коэффициентами расхода  $\Phi < 0,03$ , имеющих особенности в расчете рабочего процесса [8, 9] и моделирования течения в проточной части [10-13].

Сеточная модель создается в расчетной области, создаваемой на основании разработанных рекомендаций [14-16].

Обеспечение *сеточной независимости решения* – это исследование достаточности масштаба разбиения расчетной области на сеточные элементы, сеточных сгущений в областях больших градиентов параметров, размера пристенных ячеек и прочих факторов, связанных с сеточной моделью [17, 18].

В качестве *объекта исследования* выступает малорасходная ступень СВД-1 с условным коэффициентом расхода  $\Phi = 0,008$  и коэффициентом теоретического напора  $\Psi_T = 0,48$ , разработанная и испытанная на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (далее - кафедра КВиХТ СПбПУ). Эскиз ступени представлен на рисунке 1.

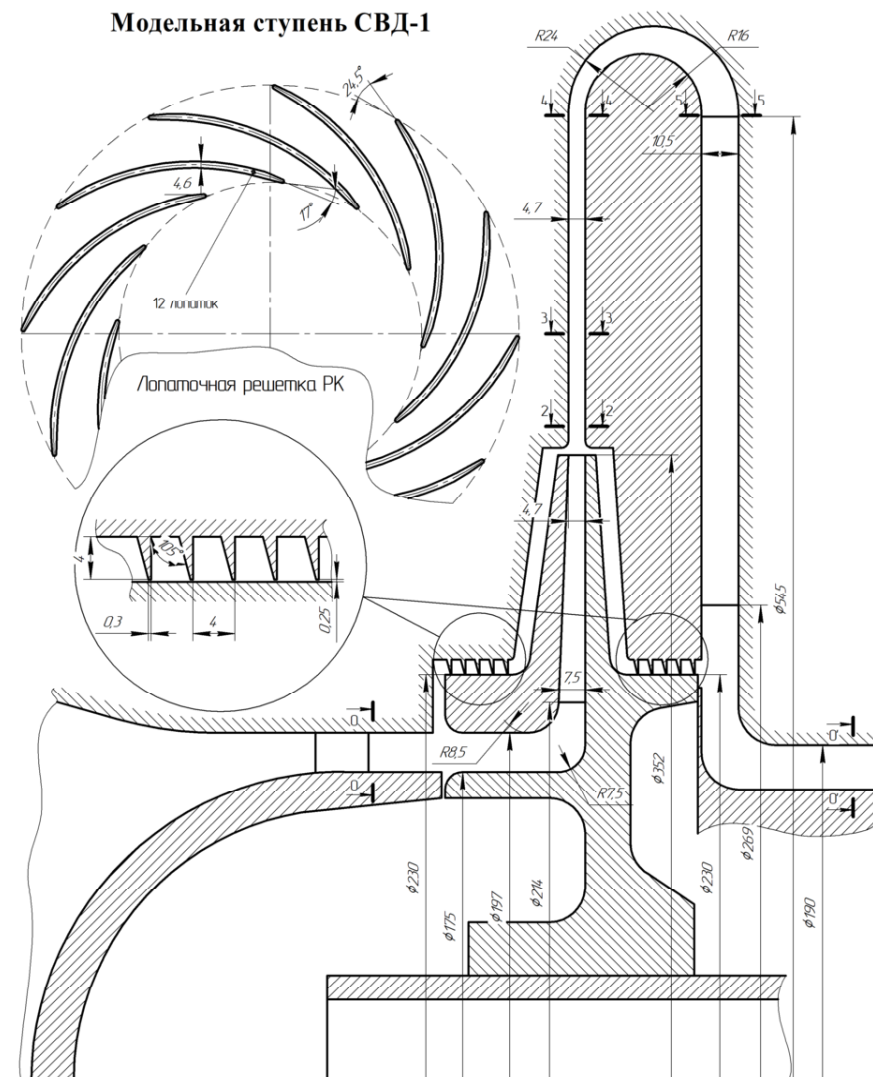


Рисунок 1 – Эскиз проточной части ступени СВД-1

### **Влияние измерительных приборов на газодинамические характеристики и параметры потока**

Проанализировано влияние на поток и газодинамические характеристики (ГДХ) трубок полного давления, используемых в экспериментальной установке для отбора в сечениях 2-2, 3-3, 4-4 и 5-5. Согласно эксперименту, в данных сечениях было выполнено четыре отбора по окружности, три из которых – неподвижные, расположенные посередине канала БЛД, а один – трехточечный цилиндрический зонд, перемещается по ширине канала. В качестве допущения расчетная модель включает 4 прибора, представленных в виде цилиндров диаметром 2мм и высотой в половину ширины канала БЛД. На рисунке 2а изображена расчетная модель диффузора с имитациями приборов измерения давления.

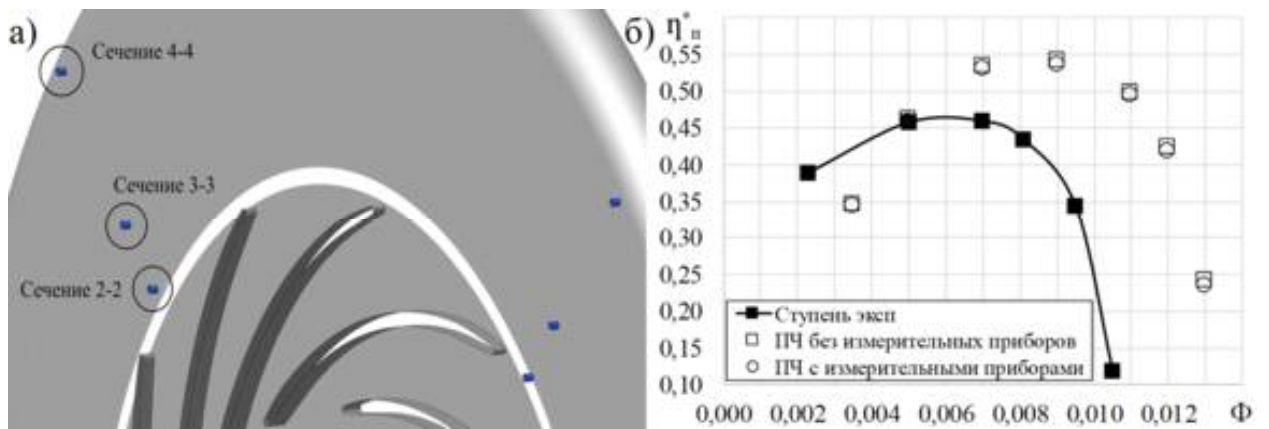
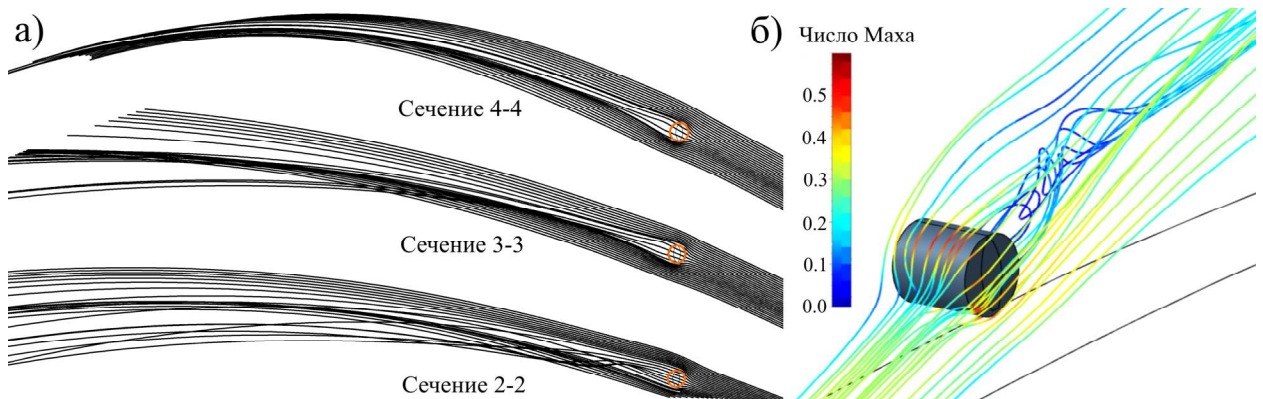


Рисунок 2 – Расчетная модель (а) и результаты моделирования ПЧ с учетом измерительных приборов

По результатам моделирования можно сделать вывод о незначительном влиянии измерительных приборов на ГДХ и течение в ПЧ и ГДХ. Рисунок 2б иллюстрирует разность  $\sim 0,3\%$  КПД ПЧ без приборов и ПЧ с имитацией приборов, что при общем уровне потерь в ПЧ малорасходной ступени и политропном КПД  $\sim 50\%$  является крайне малой величиной. Однако, очевидно, что существуют случаи, когда измерительные приборы вносят существенные возмущения в поток. В каждом отдельном случае следует проводить оценку влияния для установления необходимости учета дополнительных элементов в расчетной области модели. Численные методы также применяются для оценки влияния измерительных приборов на параметры потока с целью их калибровки [19].

На рисунке 3а изображены линии тока при обтекании приборов в сечениях 2-2, 3-3 и 4-4. Как видно, наибольшее влияние на поток оказывает прибор, расположенный в сечении 2-2, что очевидно, исходя из высокого уровня скоростей на выходе из рабочего колеса (РК). На рисунке 3б показаны трехмерные линии тока при обтекании прибора в сечении 2-2. Прибор в сечении 4-4 не оказывает принципиального влияния на поток: обтекание безотрывное, а кромочный вихрь достаточно быстро смешивается с основным потоком.



- Рисунок 3 – а) обтекание измерительных приборов в сечениях 2-2, 3-3 и 4-4;  
 б) трехмерные линии тока при обтекании измерительного прибора в сечении 2-2

В общем случае моделирование ПЧ с имитацией измерительных приборов связано со сложными и имеющими большое количество элементов сеточными моделями диффузора, затрудненным созданием качественной сеточной модели, а также необходимостью применения «Rotor-Stator» интерфейса между ПК и имитациями приборов. По результатам расчета оценено влияние приборов на течение в диффузоре и на ГДХ ступени, сделан вывод о возможности последующей верификации модели ступени с коррекцией на влияние приборов в ПЧ.

### **Обеспечение сеточной независимости для модели малорасходной ступени**

Второй этап подготовки расчетной модели – сеточная модель. Создание качественной сеточной модели для корректного описания расчетной области и получения устойчивого решения – отдельная задача, поэтому рассмотрим базовый вопрос сеточной разрешимости задачи.

Дифференцированно проанализировано обеспечение сеточной независимости в основной ПЧ и притрактовых областях для выбранной модели малорасходной ступени.

Для ПЧ ступени, имеющей два лопаточных венца – РК и обратно-направляющий аппарат (ОНА) с одним рядом лопаток, будет показательно привести результаты исследования в зависимости от общего количества сеточных элементов в модели (элементы разделяются примерно поровну между венцами). Варьирование количества ячеек сеточной модели ступени производилось в диапазоне от 0,4...7,2 млн. Расширенные параметры сеточной модели приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количество ячеек сеточной модели

Меридиональные линии	25	33	41	49	57	69	81
Ячейки в радиальном сечении ПЧ, тыс.	15,5	26,3	38,5	48	61,9	75,5	88,1
Общее количество ячеек двух венцов, млн.	0,39	0,87	1,58	2,35	3,53	5,21	7,15
Ячейки в тангенциальном направлении РК	27	39	51	59	67	75	83
Ячейки по длине лопатки РК	45	73	113	153	181	213	241
Ячейки в пристенном слое РК	13	13	17	21	21	25	33

Как видно из результатов моделирования (рисунок 4а) необходимый и достаточный размер сетки для ПЧ ~3,5 млн. ячеек на 2 лопаточных венца при характерном размере ПЧ  $D_2=352$  мм. Дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно ввиду неизменности результатов моделирования при значительном увеличении сеточной модели не только за счет ПЧ, но и за счет полностью стыкуемых притрактовых областей, в которые переносится тангенциальное распределение элементов РК и ОНА. В совокупности это ведет к необоснованному увеличению машинного времени вычисления.



Также рассмотрено обеспечение сеточной независимости по безразмерному расстоянию от стенки  $y^+$ . Рассматривая низкорейнольдсовую модель турбулентности Spalart-Allmaras, для которой рекомендуемое значение  $y^+ < 1$ , произведен расчет моделей с различным размером пристенной ячейки во всей расчетной области. Основным критерием служит поиск области значения  $y^+$ , в котором решение можно назвать условно постоянным. На рисунке 4б приведены результаты моделирования вариантов размера первой ячейки в диапазоне соответствующего среднего значения  $y^+$  на поверхности ПЧ от 0,15 до 49,5. Следует иметь ввиду, что среднее значение  $y^+$  – не абсолютный критерий истины, а лишь позволяет провести параметрическое исследование. В общем случае корректно оценивать локальные значения  $y^+$ . Области с повышенными значениями  $y^+$  могут присутствовать в модели, но только в вынужденных непротяженных областях, где нет вероятности отрыва, а погрешность расчета трения не окажет влияния на результат.

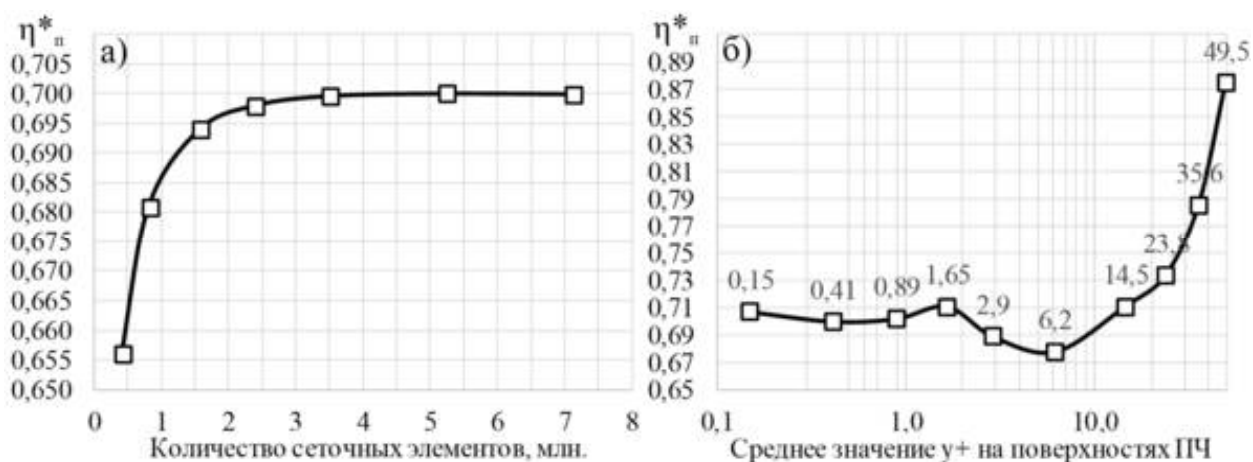


Рисунок 4 – а) результаты исследования на сеточную независимость модели ПЧ (а); б) влияние  $y^+$  для низкорейнольдсовой модели турбулентности (логарифмическая шкала)

Оценка влияния  $y^+$  при использовании низкорейнольдсовой модели показывает важность обеспечения сеточной независимости по размеру первого пристенного элемента. При среднем значении  $y^+ 0,1 \dots 1,0$  КПД расчетного режима ГДХ можно условно назвать постоянным, незначительно повышающимся при существенном уменьшении первого элемента до значений  $y^+ \sim 0,1$ , которое тоже можно считать не вполне корректным. При повышении  $y^+ > 1$  КПД сначала достаточно резко повышается на 1,5%, затем присутствует участок снижения на 3,5% и дальнейший степенной рост при повышении  $y^+$  до 50 и дальнейшей несходимости решения. В общем случае, характер зависимости параметров от  $y^+$  может принимать случайную форму и данный пример можно рассматривать как оценку влияния отклонения сеточного критерия от рекомендаций по корректной работе моделей турбулентности. Следовательно, можно сделать логичный вывод о необходимости обеспечения сеточной разрешимости пограничного слоя при использовании

низкорейнольдсовых моделей турбулентности без пристенных функций и о некорректных результатах оценки потерь при несоблюдении рекомендаций.

Аналогичное исследование проведено для сеточной модели в притрастовых областях. Данные области менее чувствительны к критерию  $y^+$  из-за вихревого типа течения, но достаточно чувствительны к уровню дискретизации модели в зазоре «диск – статор», в зазоре «выступ лабиринтного уплотнения (ЛУ) – диск» и в камерах ЛУ. Недостаточная густота в зазоре «диск – статор» приводит к неточным результатам оценки дискового трения; в зазоре «выступ ЛУ – диск» к неверному моделированию протечки через уплотнение, что в свою очередь также отражается и на дисковом трении, а в камерах ЛУ – к неточному преобразованию и рассеиванию энергии вихреобразования, что сказывается на распределении давлений в камерах ЛУ и величине перетечки.

В качестве опорной величины для корректной трактовки результатов приведем результаты влияния количества элементов в 2D сечении сетки в одном элементе ЛУ. На рисунке 5 представлены варианты сгущения сетки в ЛУ покрывающего диска. Аналогичное сгущение применялось и к уплотнению основного диска, так как уплотнения имеют одинаковую конфигурацию. В таблице 2 приведено количество сеточных элементов для вариантов сгущения в одном элементе уплотнения.

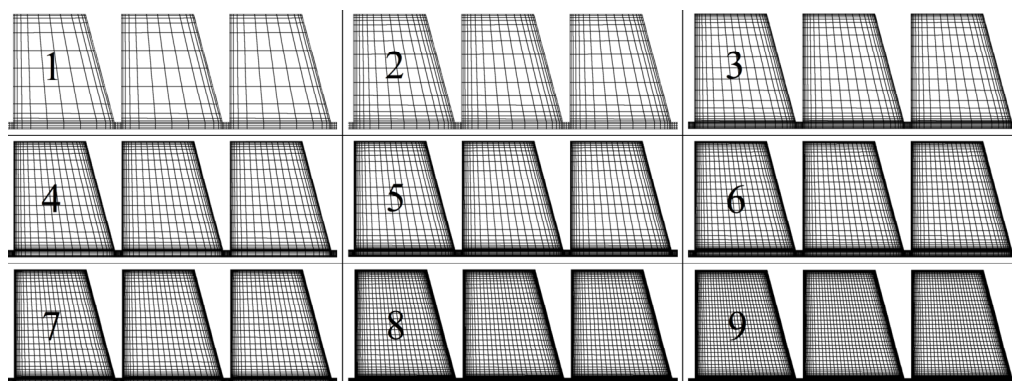


Рисунок 5 – Варианты сеточного распределения в элементах лабиринтных уплотнений

Таблица 2

Варианты сгущения сеточной модели в одном элементе ЛУ

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество 2D ячеек	259	399	711	931	1387	1687	2287	4251	6823

Результаты моделирования представлены на рисунке 6. Видно насколько большое влияние несет обеспечение сеточно-независимого решения в притрастовых областях для малорасходных ступеней. Уровень погрешности, вызываемой сеточной моделью, в



притрактовых областях сопоставим с сеточной погрешностью результатов в основной ПЧ. Коэффициент трения дисков для рассматриваемых вариантах изменяется в диапазоне от 0,145 до 0,22, причем сеточная сходимость достигается при высоком визуальном сгущении сетки в уплотнениях, соответствующих варианту ~2000 ячеек в элементе ЛУ.

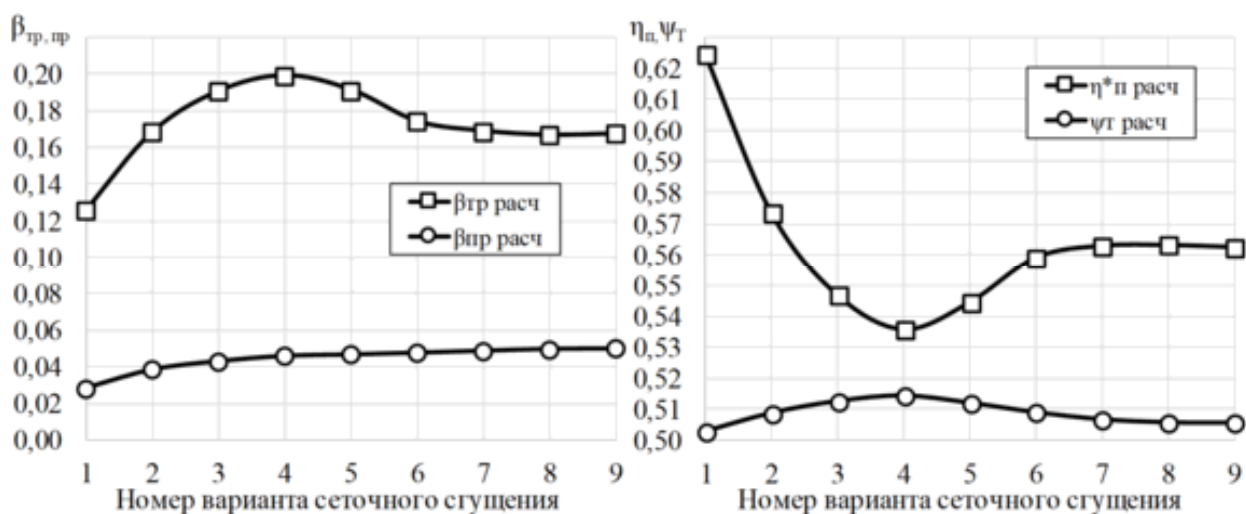


Рисунок 6 – Результаты оценки сеточной независимости в притрактовых областях

### Заключение

По результатам исследования показано принципиальное значение обеспечения сеточной независимости решения при моделировании малорасходных ступеней центробежных компрессоров. При неаккуратном подходе к выбору размера сеточной модели и размера первого пристенного элемента ГДХ ступени будет сильно отличаться. Для КПД: в пределах 5% для сеточной модели в основной ПЧ и 6% для модели в притрактовых областях. Причем влияние последнего можно рассматривать даже как более значительное, так как сеточная модель влияет одновременно и на коэффициенты потерь трения дисков, протечек, и на теоретический напор колеса за счет изменения закрутки газа на входе в РК. В качестве рекомендации к построению сеток необходимо отметить, что обеспечение сеточной независимости происходит при достаточно густом визуальном насыщении расчетными ячейками сеточной модели. Также важно контролировать значение  $y^+$ , являющееся безразмерным расстоянием до стенки, в соответствии с используемой моделью турбулентности – для низкорейнольдсовых версий моделей –  $y^+ < 1$ ; для моделей с пристенной функцией –  $y^+ \sim 25-50$ .

### Библиографический список

1. Бурдюгов С.И., Ерышкин Ю.П., Касьянов С.В., Макаров А.А. Опыт пусконаладочных работ многоступенчатых ЦБК с магнитным подвесом. Компрессорные технологии №1, 2019. С. 12-17.

2. Kozhukhov Y.V., Danilishin A.M., Kartashov S.V., Lebedev A.A., Malev K.G., Mironov Y.R. Design optimization opportunity of the end stage output plenum chamber of the centrifugal compressor for gas pumping unit. AIP Conference Proceedings 2007, 030044 (2018); doi: 10.1063/1.5051905.
3. Неверов В.В., Чеглаков И.В., Любимов А.Н. Проектирование центробежных компрессорных машин с использованием методов вычислительной газодинамики. Компрессорная техника и пневматика №4, 2018, с. 24-28.
4. Неверов В.В., Кожухов Ю.В., Яблоков А.М., Лебедев А.А. Расчетная модель при численной оптимизации рабочих колес центробежных компрессоров. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Вып. 4(254)/2016. Изд. СПбГПУ. С. 45 – 58.
5. 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 моделирования в Ansys CFX. Компрессорные технологии №2, 2019. С. 18-25.
6. Pinto, R. N., Afzal, A., D'Souza, L. V., Ansari, Z., & Mohammed Samee, A. D. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. Archives of Computational Methods in Engineering, 24(3), 467–479. (2016). doi:10.1007/s11831-016-9175-2.
7. Denton J.D. Some Limitations of Turbomachinery CFD. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 7: Turbomachinery, Parts A, B, and C:735-745. doi:10.1115/GT2010-22540.
8. Эккерт Б. Осевые и центробежные компрессоры. Применение, теория, расчет Пер.с нем. / Пер. Фролов Е.С., Захаров Б.Д. - М.: Гос.науч.-техн.изд-во машиностроит. лит., 1959. - 678 с.
9. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. – Л. : Машиностроение, 1981. – 351 с.
10. Иванов В.М., Кожухов Ю.В., Данилишин А.М., Садовский Н.И. Моделирование и валидация рабочего процесса в модельной малорасходной ступени центробежного компрессора. Новое в российской электроэнергетике. №6. 2019. С. 12-19.
11. Кожухов Ю.В., Никитин Е.Г. Применение суперкомпьютерных технологий при исследовании методами вычислительной газодинамики пространственного течения малорасходной ступени СВД-22 центробежного компрессора. Труды Международной суперкомпьютер-ной конференции «Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма». пос. Абрау-Дюрсо. 2013. С. 312-320.

12. Кожухов Ю.В., Чеглаков И.В. Исследование рабочего процесса в малорасходной центробежной компрессорной ступени СВД-22 в программном комплексе Fine/Turbo с верификацией данных расчета. Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство»: Сборник материалов научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения главного конструктора П. А. Колесова. – Т. 1. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2015. – 250 с. С.135-139.
13. Lettieri C.C., Baltadjiev N.N., Casey M.M., Spakovszky Z.Z. Low-Flow-Coefficient Centrifugal Compressor Design for Supercritical CO<sub>2</sub>. ASME. J. Turbomach. (2014);136 (8):081008-081008-9. doi:10.1115/1.4026322.
14. Карташов С.В., Кожухов Ю.В. Обоснование выбора расчетной области в задачах моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежного компрессора. Холодильная техника. №1. 2020. С. 22 – 27.
15. Ayhan Nazmi Ilikan and Erkan Ayder. Effect of the Computational Domain Selection on the Calculation of Axial Fan Performance. 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Apr 2016, Honolulu, United States. (hal-01884255)
16. 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. 232(1),012037. (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/232/1/012037.
17. Le Sausse P., Fabrie P., Arnou D., Clunet F. CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range. (2013). EPJ Web of Conferences, Vol. 45, p. 01059.
18. Свобода Д.А., Жарковский А.А. Экспериментальные и расчетные исследования осевого насоса с быстроходностью  $ns=560$  // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013, т.15 №4(2), с. 579-582.
19. Aschenbruck, J., Hauptmann, T., and Seume, J., 2015, “Influence of a Multi-Hole Pressure Probe on the Flow Field in Axial-Turbines”, Proceedings of 11th European Turbomachinery Conference, March 23-27 2015, Madrid, Spain ETC2015-155.

### References

1. Burdyugov S.I., Eryshkin Y.P., Kas'yanov S.V., Makarov A.A. Opyt puskonaladochnykh rabot mnogostupenchatykh TsBK s magnitnym podvesom. Kompessornye tekhnologii №1, 2019.S. 12-17

2. Kozhukhov Y.V., Danilishin A.M., Kartashov S.V., Lebedev A.A., Malev K.G., Mironov Y.R. Design optimization opportunity of the end stage output plenum chamber of the centrifugal compressor for gas pumping unit. AIP Conference Proceedings 2007, 030044 (2018); doi: 10.1063/1.5051905.
3. Neverov V.V., Cheglakov I.V., Lyubimov A.N., *Proyektirovaniye tsentrobezhnykh kompressornykh mashin s ispolzovaniyem metodov vychislitelnoy gazodinamiki, Kompessornaya tekhnika i pnevmatika №4, 2018, S. 24-28.*
4. Neverov V.V., Kozhukhov Y.V., Yablokov A.M., Lebedev A.A. Raschetnaya model pri chislennoy optimizatsii rabochikh koles tsentrobezhnykh kompressorov. *Naychno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Vyp. 4(254)/2016. Izd. SPbGPU.S. 45-58.*
5. Rakhmanina L.A., Aksenov A.A. Issledovanie vliyaniya neravnomernogo raspredeleniya absolutnoj skorosti potoka na vkhode v oseradial'noe rabochee koleso tsentrobezhnogo kompressora s primeneniem metodov chislennogo modelirovaniya v Ansys CFX. *Kompessornye tekhnologii №2, 2019. S. 18-25.*
6. Pinto, R. N., Afzal, A., D'Souza, L. V., Ansari, Z., & Mohammed Samee, A. D. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. *Archives of Computational Methods in Engineering, 24(3), 467–479. (2016). doi:10.1007/s11831-016-9175-2.*
7. Denton J.D. Some Limitations of Turbomachinery CFD. ASME. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 7: Turbomachinery, Parts A, B, and C:735-745. doi:10.1115/GT2010-22540.*
8. Ekkert B. *Osevyye i tsentrobezhnyye kompressory. Primeneniye, teoriya, raschet Per.s nem. / Per. Frolov Ye.S., Zakharov B.D. - M.: Gos.nauch.-tekhn.izd-vo mashinostroit.lit., 1959. - 678 s.*
9. Ris V.F. *Tsentrobezhnyye kompressornyye mashiny. – L. : Mashinostroyeniye, 1981. – 351 s.*
10. Ivanov V.M., Kozhukhov Y.V., Danilishin A.M., Sadovskij N.I. Modelirovanie I validatsiya rabocheho protsessa v modelnoj maloraskhodnoj stupeni tsentrobezhnogo kompressora. *Novoe v rossijskoj ehlektroehnergetike. №6. 2019. S. 12-19.*
11. Kozhukhov Y.V., Nikitin E.G. Primenenie superkomp'uternykh tekhnologij pri issledovanii metodami vychislitelnoj gazodinamiki prostranstvennogo techeniya maloraskhodnoj stupeni SVD-22 tsentrobezhnogo kompressora. *Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'uternoj konferentsii "Nauchnyj servis v seti Internet: vse grani parallelizma". Pos. Abrau-Dyurso. 2013. S. 312-320.*
12. Kozhukhov Y.V., Cheglakov I.B. Issledovanie rabocheho protsessa v maloraskhodnoj tsentrobezhnoj kompressornoj stupeni SVD-22 v programmnom komplekse Fine/Turbo s

- verifikatsiej dannykh rascheta. Mezhdunarodnyj tekhnologicheskij forum “Innovatsii. Tekhnologii. Proizvodstvo”: Sbornik materialov nauchno-tekhnicheskoj konferentsii, posvyazshchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya glavnogo konstruktora P.A. Kolesova. – T.1. – Rybinsk: RGATU imeni P. A. Solov’eva. 2015. -250 s. S. 135-139.
13. Lettieri C.C., Baltadjiev N.N., Casey M.M., Spakovszky Z.Z. Low-Flow-Coefficient Centrifugal Compressor Design for Supercritical CO<sub>2</sub>. ASME. J. Turbomach. (2014);136 (8):081008-081008-9. doi:10.1115/1.4026322.
  14. Kartashov S.V., Kozhukhov Y.V. Obosnovanie vybora raschetnoj oblasti v zadachah modelirovaniya vyazkogo potoka v maloraskhodnyh stupenyah centrobezhnogo kompressora. Holodil'naya tekhnika. №1. 2020. S. 22 – 27.
  15. Ayhan Nazmi Ilikan and Erkan Ayder. Effect of the Computational Domain Selection on the Calculation of Axial Fan Performance. 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Apr 2016, Honolulu, United States. (hal-01884255)
  16. 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. 232(1),012037. (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/232/1/012037.
  17. Le Sausse P, Fabrie P, Arnou D, Clunet F (2013) CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range. EPJ Web of Conferences, Vol. 45, p. 01059.
  18. Svoboda D.A., Zharkovskiy A.A. Eksperimentalnyye i raschetnyye issledovaniya oseвого nasosa s bystrokhodnostyu  $n_s=560$  // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, 2013, t.15 №4(2), s. 579-582.
  19. Aschenbruck, J., Hauptmann, T., and Seume, J., 2015, “Influence of a Multi-Hole Pressure Probe on the Flow Field in Axial-Turbines”, Proceedings of 11th European Turbomachinery Conference, March 23-27 2015, Madrid, Spain ETC2015-155.