

Анализ зависимости параметров 2FSI подсистемы от диаметра лабиринтного уплотнения центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата

Л.Н. Бутымова¹, В.Я. Модорский¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, пр. Комсомольский 29, Пермь, Россия, 614099

Аннотация. В системе центробежного компрессора ГПА имеется несколько 2FSI подсистем: рабочее колесо, лабиринтные уплотнения (ЛУ), думмис и др. В статье рассматривается анализ зависимости одной подсистемы - лабиринтного уплотнения - от его диаметра. Изучается влияние этого параметра на волновые процессы, протекающие в лабиринтных уплотнениях при вибрациях ротора. Получено решение нестационарной аэроупругой трехмерной задачи о течении газа в деформируемом ЛУ. Получены амплитудно-частотные характеристики газодинамических и вибрационных параметров ЛУ ЦК ГПА. Получены временные зависимости газодинамической силы и работы газодинамических сил в зоне ЛУ при различных диаметрах ротора.

1. Физическая модель

Рассматривалась расчетная модель лабиринтного уплотнения, представляющая собой совокупность газодинамического зазора ЛУ и стального кольца ЛУ в 3D постановке. Отслеживалось изменение газодинамической силы во времени, рассчитываемой через поле давлений, действующее непосредственно на ротор [1-12]. Движение ротора описывалось гармоническим законом с заданными амплитудой и частотой [13-16]. При назначении частоты колебаний ротора учитывались лопаточная частота и частота вращения. Варьировались геометрические характеристики ротора и оценивалось их влияние на волновые процессы, протекающие в лабиринтных уплотнениях при вибрациях ротора. На входе и выходе ЛУ задается перепад давления. Особое внимание уделялось оценке волновых процессов в окружном направлении [17-26]. В качестве параметра исследуемых зависимостей принимается диаметр ротора в районе ЛУ.

2. Твердотельная модель

Твердотельная модель (базовый вариант) представляет собой кольцеобразный газодинамический зазор ЛУ шириной 37 мм, высотой 500 мкм и диаметром 422 мм. Твердотельное кольцо ЛУ представляет собой сложную ступенчатую конструкцию (рисунок 1). Материал конструкции – сталь, перепад давления не учитывался, рабочее тело – совершенный газ.

План проведения ВЭ по исследованию резонансов в 2FSI подсистеме «лабиринтные уплотнения» (ЛУ) ГПА приведен в таблице 1. Параметры варьируются относительно "базового варианта".

Таблица 1. План проведения ВЭ.

№ варианта	1 (БВ ¹)	2	3
D _{ротора} , мм	422	294	550

(БВ¹) – базовый вариант

Расчет длится 8,5 часов при исследовании совершенного газа и отсутствии перепада давления. Предварительные расчеты показали, что время расчета увеличивается и достигает 48 часов для вариантов, соответствующих реальным газам и наличию перепада давления в ЛУ. Объем потребных вычислительных ресурсов ограничивается возможностями ANSYS по распараллеливанию прочностной части 2FSI расчетов. Ускорение расчетов напряженно-деформированного состояния конструкции в 2FSI постановке наблюдалось при использовании лишь до 8 ядер (1 узел). При дальнейшем увеличении числа расчетных ядер скорость счета не повышалась.

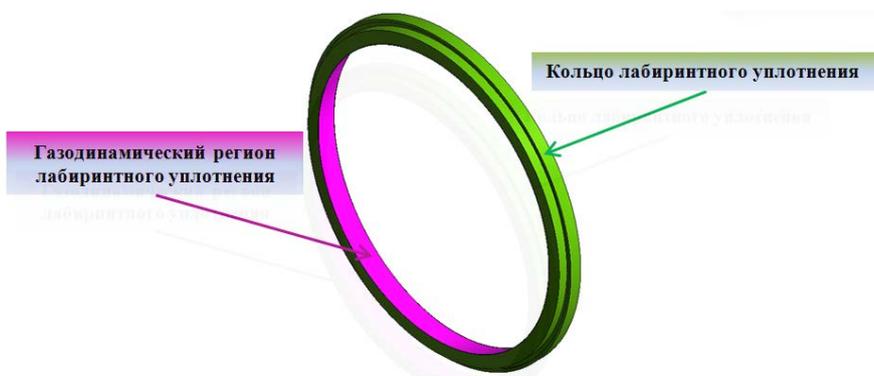


Рисунок 1. Твёрдотельная модель 2FSI подсистемы ЛУ ЦК ГПА.

3. Сеточная модель

Минимальный размер конечных элементов сеточной модели кольца ЛУ и газодинамического зазора ЛУ равен 3,75мм, тип элемента – гексаэдральный (рисунок 2). Для реализуемости 2FSI расчетов при построении сеточных моделей газодинамического региона и прочностного региона было обеспечено совпадение соответствующих сетевых элементов на границе передачи данных из одного типа анализа в другой.

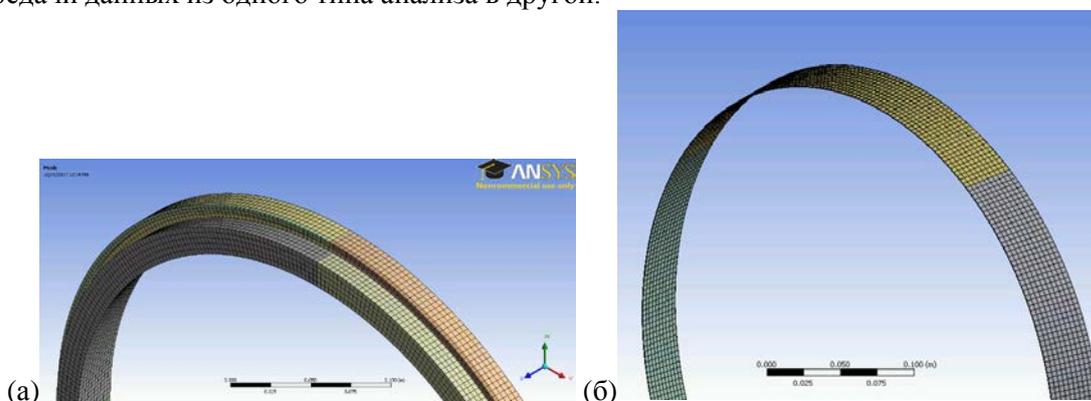


Рисунок 2. Сеточная модель 2FSI подсистемы ЛУ ЦК ГПА. (а) – сеточная модель кольца лабиринтного уплотнения; (б) – сеточная модель газодинамического региона лабиринтного уплотнения.

4. Подготовка и проведение расчетов по оценке влияния геометрических характеристик ЛУ на окружные колебания в 2FSI подсистеме ЛУ ЦК ГПА

В соответствии с планом ВЭ исследовано влияние геометрических характеристик ЛУ на окружные колебания в 2FSI подсистеме ЛУ ГПА. Получены временные зависимости давления,газодинамической силы,работы газодинамических сил исуммарных перемещений в кольцеЛУот диаметра ротора (рисунок 3).

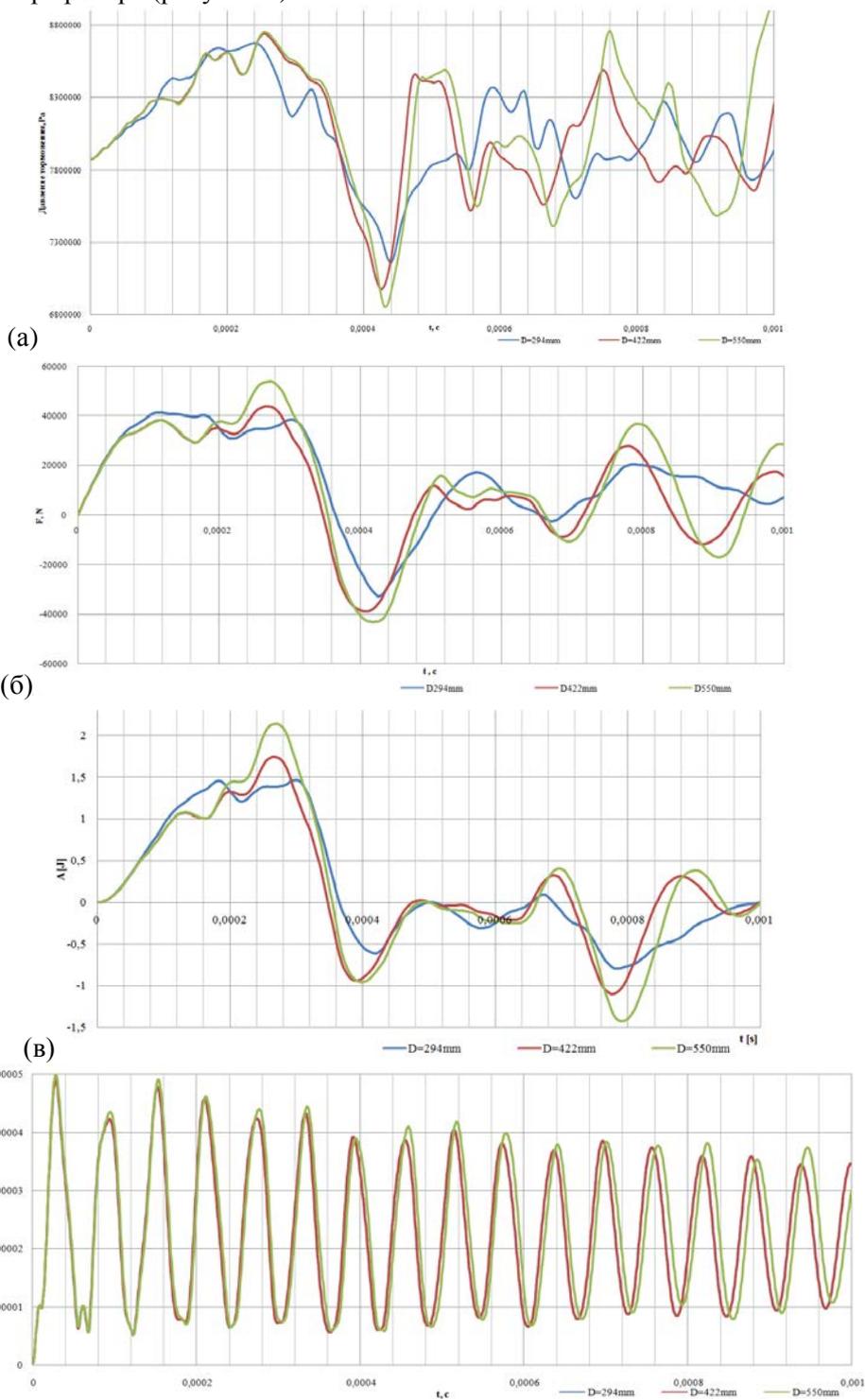
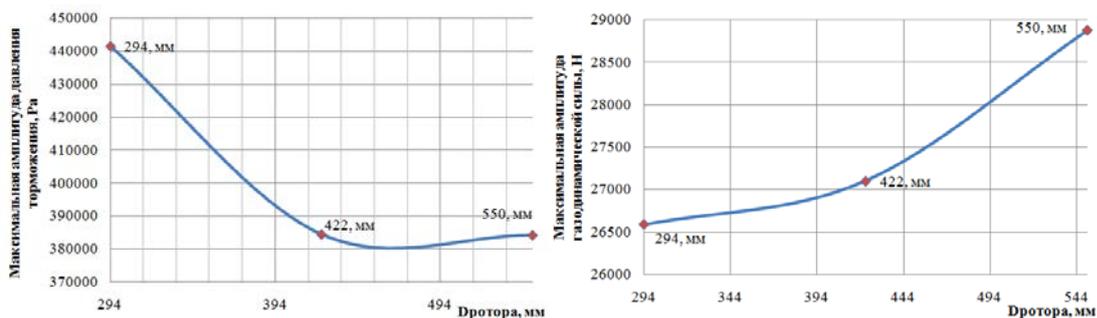
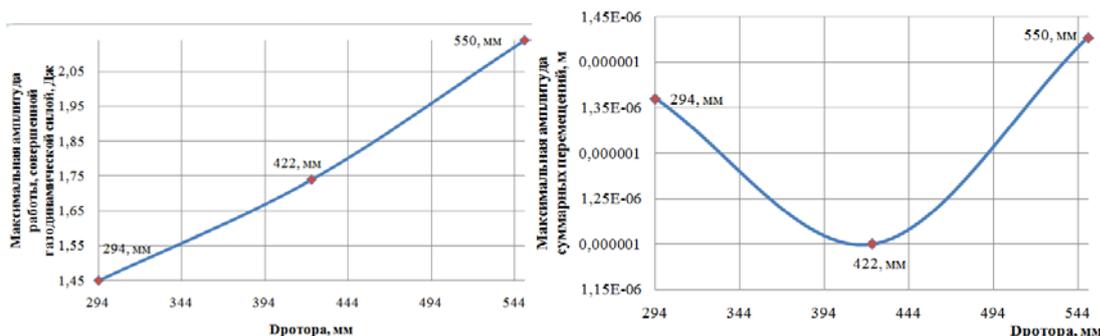


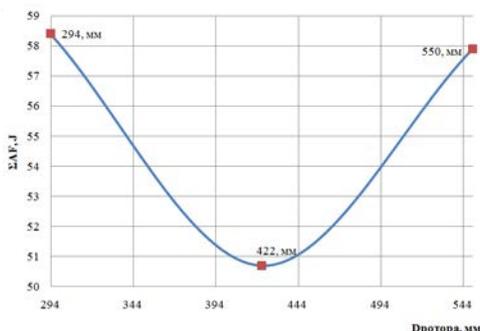
Рисунок 3. Временные зависимости параметров 2FSI подсистемы ЛУ ЦК ГПА от диаметра ротора. (а)–давление в газодинамическом зазоре ЛУ; (б)–газодинамическая сила; (в)–работа газодинамической силы; (г) – суммарные перемещения в кольце ЛУ.



(а)(б)



(в)(г)



(д)

Рисунок 4. Анализ временных зависимостей параметров 2FSI подсистемы ЛУ ЦК ГПА от диаметра ротора. (а) – максимальная амплитуда давления торможения; (б) – максимальная амплитуда газодинамической силы; (в) – максимальная амплитуда работы газодинамической силы; (г) – максимальная амплитуда суммарных перемещений; (д) – суммарная работа газодинамической силы.

При проведении анализа временных зависимостей 2FSI подсистемы ЛУ ЦК ГПА от геометрических параметров ЛУ (рисунок 4) было выявлено:

- с увеличением диаметра вала с 294 мм до 550 мм максимальная амплитуда газодинамической силы наблюдается при диаметре равном 550 мм и равна 28,9 кН, минимальное значение амплитуды газодинамической силы наблюдается при диаметре равном 294 мм и равно 26,6 кН;
- частота максимальной амплитуды газодинамической силы постоянна и равна 1,5 кГц для рассмотренного диапазона диаметров и не равна частоте вынуждающего воздействия (0,95 кГц);

- с увеличением диаметра от 294 мм до 550 мм максимальная амплитуда колебаний давления торможения не меняется;

- с увеличением диаметра от 294 мм до 550 мм максимальная амплитуда суммарных перемещений не меняется;

– с увеличением диаметра от 294 мм до 550 мм (в 1,9 раза) наблюдается увеличение максимальной амплитуды работы, совершаемой газодинамической силой с 1,45 Дж до 2,14 Дж (в 1,5 раза);

– на рисунке 4а видно, что при диаметре равном 294 мм амплитуда колебаний давления максимальна. Спектральный анализ показал, диаметру равному 294 мм соответствует колебательный процесс с резонансной частотой 1800 Гц, что кратно (в 2 раза больше) частоты колебаний ротора. При этом необходимо уточнить, что частота колебаний ротора задавалась равной лопаточной частоте.

Лабиринтным уплотнениям с диаметрами равными 422 мм и 550 мм соответствуют колебательные процессы с резонансными частотами 1260 Гц и 720 Гц, соответственно, которые не кратны возбуждающей частоте. При этом наблюдается снижение амплитуд колебаний давления на этих диаметрах (рисунок 4а.)

5. Выводы

1. Обнаружено влияние диаметра ЛУ на характер колебательного процесса в ЛУ.
2. При совпадении (кратности) частот колебаний ротора и газа в ЛУ (в окружном направлении) наблюдается рост максимальных амплитуд давления торможения в ЛУ.
3. Суммарная работа газодинамических сил положительна в рассмотренном интервале диаметров, что указывает на возможность "раскачки" системы (рисунок 4д).
4. Для снижения амплитуды колебательного процесса необходима «отстройка» от совпадения частот колебаний ротора и газодинамического объема ЛУ за счет изменения, на этапе проектирования, диаметра ЛУ.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

7. Литература

- [1] Бутымова, Л.Н. Влияние вибраций на газодинамические процессы в лабиринтных уплотнениях центробежного модельного компрессора газоперекачивающего агрегата / Л.Н. Бутымова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 47. – С. 243-259.
- [2] Butymova, L.N. Numerical modeling of interaction in the dynamic system "gas-structure" with harmonic motion of the piston in the variable section pipe / L.N. Butymova, V.Ya. Modorskii, V.Yu. Petrov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030103-1-030103-5.
- [3] Butymova, L.N. One-way FSI simulation of the phase and the geometric parameters of the model of compressor blades on the oscillating gas-dynamic processes pipe / L.N. Butymova, V.Ya. Modorskii // MATEC Web Conf. – 2016. – Vol. 75. – P.4.
- [4] Бутымова, Л.Н. Численное моделирование влияния кинематических параметров на колебания лопаток модельного компрессора в системе «газ-конструкция» / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 5. – С. 157-160.
- [5] Бутымова, Л.Н. Экспериментальная оценка амплитудных и фазовых характеристик процесса взаимодействия газодинамического потока и конструкции / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, А.Ф. Шмаков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 127-129.
- [6] Бутымова, Л.Н. Исследование газодинамического потока и конструкции в модельной экспериментальной установке / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2014. – Т. 3, № 2. – С. 92-100.
- [7] Бутымова, Л.Н. Исследование колебательных процессов на резонансных режимах в модельной установке / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 6. – С. 193-196.

- [8] Бутымова, Л.Н. Разработка экспериментальной установки и исследование влияния материала корпуса на резонансные частоты в системе «газ-конструкция» / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, Ю.В. Соколкин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 6. – С. 197-200.
- [9] Мехоношина, Е.В. Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора / Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 264-268.
- [10] Mekhonoshina, E.V. Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units / E.V. Mekhonoshina, V.Ya. Modorskii // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – С. 030113-1-030113-5.
- [11] Макаров, А.А. Инженерные и теоретические задачи применения лабиринтных уплотнений в высокоскоростных роторных машинах / А.А. Макаров, Н.Н. Зайцев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 42. – С. 61-81.
- [12] Брыкин, Б.В. Численное моделирование эксперимента по исследованию течения в лабиринтном уплотнении / Б.В. Брыкин, И.Е. Евдокимов // Труды МАИ. – 2012. – № 61. – С. 1-12.
- [13] Арбузов, И.А. Анализ влияния конструкции входа в соединительный канал на колебательные процессы в первой ступени модельного двухступенчатого насоса / И.А. Арбузов, А.А. Ташкинов, Д.В. Щенятский, Б.Е. Кириевский, Р.В. Бульбович, В.Я. Модорский, П.В. Писарев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 108-111.
- [14] Butymova, L.N. Development and application of a unified algorithm for solving the interdisciplinary problem of modeling aeroelastic processes in the labyrinth seal of centrifugal compressors / L.N. Butymova, V. Ya. Modorskii // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1893. – Art. 030067.
- [15] Shmakov, A.F. Numerical simulation of gas-dynamic, thermal processes and evaluation of the stress-strain state in the modeling compressor of the gas-distributing unit / A.F. Shmakov, V. Ya. Modorskii // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030108-1-030108-5.
- [16] Babushkina, A.V. Modeling technique for the process of liquid film disintegration / A.V. Babushkina, V. Ya. Modorskii, A.M. Sipatov, D.Yu. Kolodyazhny, V.S. Nagorny // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030109-1-030109-7.
- [17] Kalyulin, S.L. Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel / S.L. Kalyulin, V. Ya. Modorskii, A.P. Paduchev // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030110-1-030110-4.
- [18] Modorskii, V. Ya. Research of aerohydrodynamic and aeroelastic processes on PNRPU HPC system / V. Ya. Modorskii, N.A. Shevelev // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030110-1-030110-4.
- [19] Акжолов, М.Ж. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц. Исследование актуальных проблем механики и машиностроения / М.Ж. Акжолов, П.М. Алабужев, А.В. Алиев, Л.М. Артищева, Л.Г. Бойко, Н.Л. Горский, Ю.А. Гришин, И.М. Давыдова, М.Ю. Егоров, И.Х. Еникеев, В.М. Кельберг, В.А. Комочков, В.В. Кондрашев, П.И. Косовцев, В.А. Котельников, А.Е. Котин, М.Г. Круглов, А.М. Липанов, В.И. Макаров, О.Г. Маслова, В.Я. Модорский. – Москва: Национальная Академия прикладных наук, Международная ассоциация разработчиков и пользователей метода крупных частиц. – 1995. – Т. 5. – 1658 с.
- [20] Бутымова, Л.Н. Анализ работы газодинамических сил в лабиринтных уплотнениях центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов / Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 132-134.
- [21] Shmakov, A.F. Energy Conservation in Cooling Systems at Metallurgical Plants / A.F. Shmakov, V. Ya. Modorskii // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59(9). – P. 882-886.
- [22] Mekhonoshina, E.V. On a phase-shift of waves at the medium interface / E.V. Mekhonoshina, V. Y. Modorskii // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39. – P. 385-391.

- [23] Butymova, L.N. Numerical modeling of the labyrinth seal taking into account vibrations of the gas transmittal unit rotor in aeroelastic formulation/ L.N. Butymova, V.Ya. Modorskii // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1902. – P. 10-17. DOI: 10.18287/1613-0073-2017-1902-10-17.
- [24] Модорский, В.Я. Параллельный расчет газодинамического процесса в крупногабаритном нагнетателе / В.Я. Модорский, А.Ф. Шмаков, Л.Н. Бутымова, Д.Ф. Гайнутдинова, Е.В. Мехоношина, С.Л. Калюлин // Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров Труды Международной суперкомпьютерной конференции. Российская академия наук Суперкомпьютерный консорциум университетов России, 2014. – С. 258-262.
- [25] Gaynutdinova, D.F. Infrastructure of data distributed processing in high-speed process research based on hydroelasticity tasks / D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorskii, G.F. Masich // Procedia Computer Science. – 2015.– P. 556-563.
- [26] Gaynutdinova, D.F. Optimization in Design of Scientific Products for Purposes of Cavitation Problems / D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorskii, V.P. Gergel // AIP Conference Proceedings. – 2016.– Vol.1738. – Art. 400013.

Dependence analysis of 2FSI subsystem parameters on the centrifugal compressor labyrinth seal diameter in the gas transmittal unit

L.N.Butymova¹, V.Ya.Modorskii¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29, Perm, Russia, 614990

Abstract. The GTU centrifugal compressor has several 2FSI subsystems: an impeller, labyrinth seals (LS), dummies, etc. The article considers analysis of dependence of one subsystem - the labyrinth seal - on its diameter. Effect of this parameter on the wave processes occurring in labyrinth seals during the rotor vibrations is studied. Solution is obtained for the nonstationary aeroelastic three-dimensional gas flow problem in a deformable LS. Amplitude-frequency characteristics of the gas dynamic and vibration parameters of the CC LS in GTU are obtained. Time dependence of the gas-dynamical force and gas-dynamic force work in the LS area at different rotor diameters are obtained.

Keywords: 2FSI subsystem, gas-dynamic force, work of gas dynamic forces, numerical simulation, labyrinth seal.