

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.7>

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ ДИСКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Научная статья

Нестеренко Г.А.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-1528-4627;

¹ Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nga112001[at]list.ru)

Аннотация

В работе представлена методика расчета прогибов полотна дисков осевых компрессоров и насосов. Методика основана на основных положениях теории упругости круглых пластин. В качестве основы расчета использован метод начальных параметров. В статье описано предложение по замене радиальных сил закрепления на осевую сосредоточенную силу.

Описана методика замены и приведен вывод основных уравнений, описывающих влияние сил закрепления на формирование и величину осевого смещения полотна диска. Приведены основные уравнения для расчета прогибов дисков.

Статья содержит описание результатов экспериментальных исследований и их сравнение с результатами расчетов по предлагаемой методике. Даны практические рекомендации по использованию данной методики.

Ключевые слова: диск компрессора, сила закрепления, смещение полотна, точность обработки, расчет.

ASSESSMENT OF DEFORMATION OF POWER MACHINE DISCS IN THE MANUFACTURING PROCESS

Research article

Nesterenko G.A.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-1528-4627;

¹ Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

* Corresponding author (nga112001[at]list.ru)

Abstract

The work presents a methodology for calculation of blade deflections of axial compressor and pump discs. The methodology is based on the basic provisions of the theory of elasticity of circular plates. The method of initial parameters is used as a basis of calculation. The article describes a proposal to replace radial fixing forces by an axial concentrated force.

The replacement methodology is described and the derivation of basic equations describing the influence of fixing forces on the formation and magnitude of axial displacement of the disc web is given. The basic equations for calculating disc deflections are presented.

The article contains a description of the results of experimental research and their comparison with the results of calculations according to the proposed method. Practical recommendations on the use of this methodology are given.

Keywords: compressor disc, gripping force, sheet displacement, machining accuracy, calculation.

Введение

Обработка дисков осевых энергетических машин, таких как компрессора и насосы, неразрывно связана с возникновением погрешностей. Основными причинами возникновения погрешностей являются силы, действующие в технологической системе. К таким силам принято относить составляющие силы резания и силы, действующие со стороны технологических приспособлений. При обработке дисков изготовленных из титановых сплавов в процессе механической обработки резанием возникает потеря геометрической точности его полотна.

В работах [1], [2] указано, что сложность изготовления представленных деталей связана с их малой жесткостью, что приводит к технологическим потерям, особенно на начальных этапах освоения производства. Известно [3], что для уменьшения потерь необходимо снижать режимы резания, тем самым уменьшая силы резания. Но снижение режимов приводит к увеличению времени на обработку деталей, то есть производительность падает.

Для оценки точности изготовления требуется провести комплексный анализ степени влияния каждой из указанных сил. Для этого необходимо использовать имеющиеся методики расчета, однако не всегда имеющиеся методики позволяют учесть комплексное действие сил в технологической системе.

При исследовании данного вопроса было установлено, что необходимо уточнить имеющиеся методики расчета, причем обеспечить их прикладной характер. В работах [4], [5] приводится описание процессов управления деформациями применительно к корпусным деталям, деталям типа «Вал» и т.д., однако, описание процессов деформирования полотна диска во время обработки недостаточно представлено в литературе.

Целью работы является составление математического описания совместного влияния сил в технологической системе на формирование погрешности обработки при изготовлении деталей типа «диск» на этапе технологической подготовки производства.

Задачами исследования являлись определение сил, действующих на обрабатываемую заготовку и оценка их влияния на формирование прогиба полотна диска.

Методы и принципы исследования

При проведении расчетов величины деформации полотна диска использовался метод начальных параметров (МНП) [6], который позволяет численно оценить влияние технологических условий обработки на формирование прогиба полотна диска.

Исходным уравнением метода начальных параметров для расчета является:

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{rdr}\right)\left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{dw}{rdr}\right) = \frac{q(r)}{D} \quad (1)$$

К основным положениям представленного метода расчета относятся:

1. Вид искомой функции, который должен быть таким, чтобы выражение для каждого $(i+1)$ -го участка содержало в себе слагаемое для i -го участка. При переходе на каждый последующий участок отражает влияние нового силового фактора.

2. Произвольные постоянные отражают физический смысл и их выражают через значения w , M_r , M_q .

Расчеты с использованием МНП необходимо проводить в следующей последовательности:

1. Задать расчетную модель или расчетную схему.

2. Разделить исследуемый образец на некоторое число участков.

3. Выбрать необходимые граничные условия для расчета.

4. Для выбранных участков с заданными граничными условиями записать уравнения.

5. Определить величину прогиба w полотна диска и сравнить ее с допускаемыми значениями.

В случае, когда величина прогиба в точке приложения силы резания составляет более 85% от величины допуска, тогда делается вывод о том, что заданный конструктором допуск не будет выдержан, когда значение величины прогиба не превосходит указанную величину, в этом случае можно сделать вывод о том, что заданный допуск будет выдержан и деталь окажется годной.

Когда допускаемая величина погрешности не превосходит 0,5 мм, тогда расчет величины деформации можно производить, используя уравнение:

$$w_1 = (w_0 E h^3 / (12 - (1 - m^2))) - r^2 M_{r0} y_{wr} - r^2 M_{q0} y_{wp} - P_y r^2 y_{wq} / E h^3 / (12 - (1 - m^2)) \quad (2)$$

где w_1 – прогиб от действия силы резания;

w_0 – прогиб на внутреннем радиусе диска;

M_{r0} , M_{q0} – моменты, действующие на внутреннем радиусе в радиальном и тангенциальном направлениях, соответственно;

r – текущий радиус, на котором рассчитывается прогиб;

P_y – составляющая силы резания;

y_{wr} , y_{wp} , y_{wq} – сопровождающие функции [6];

E – модуль упругости;

m – коэффициент Пуассона;

h – толщина диска.

Для нахождения w_0 , M_{r0} , M_{q0} определяются граничные условия, которые напрямую зависят от расчетной схемы. Для различных профилей диаметрального сечения исследуемого диска рассматриваются несколько схем.

Основные результаты

На величину деформации заготовки непосредственное влияние оказывают силы, приложенные к заготовке со стороны приспособления. Их действие увеличивает величину осевого смещения полотна диска. При приложении силы закрепления в осевом направлении воздействие на диск будет непосредственным. Величина этого воздействия находится из силового расчета.

На устойчивость полотна диска к прогибам большое влияние оказывает сила закрепления, действующая в радиальном направлении. Устойчивость диска снижается при воздействии сжимающих усилий закрепления.

Увеличение прогиба полотна диска происходит в случае, когда величина силы превосходит критическое значение. Критическую силу можно найти, используя метод Григोलюка [7]:

$$P_{Зркр} = \frac{k_1 D}{r_H^2} \quad (3)$$

где $P_{зкр}$ – критическая величина радиальной силы закрепления;

r_n – наружный радиус полотна диска;

k_1 – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона.

Радиальная сила закрепления снижает устойчивость полотна диска, а это приводит к увеличению величины его прогиба. Исследованиями установлено, что такую же величину прогиба полотна диска можно получить если увеличить силу резания на некоторую величину, которая будет заменять действие радиальной силы закрепления (рис. 1). Приращение силы называется «эквивалентной силой», которая совпадает с силой резания по направлению, а точка ее приложения совпадает с точкой приложения силы резания.

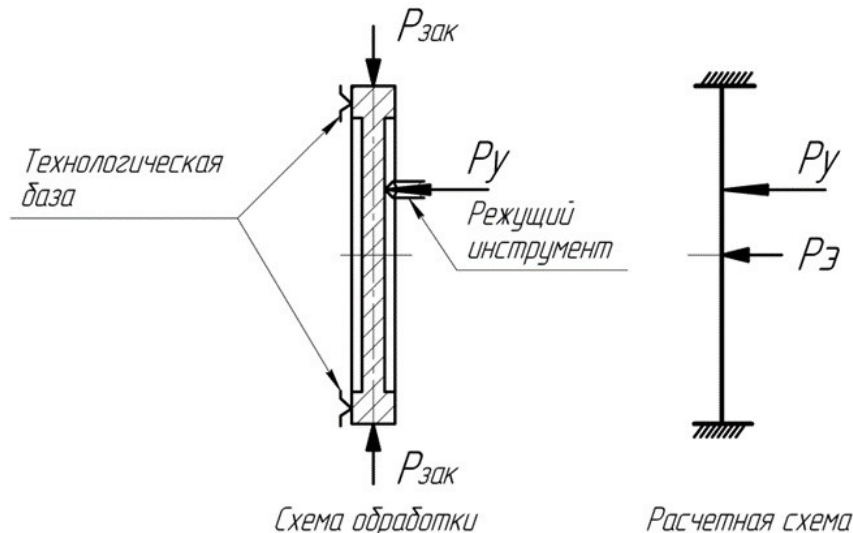


Рисунок 1 - Схема замены радиальной силы закрепления на эквивалентную силу
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.7.1>

Величина эквивалентной силы определяется из выражения для полной энергии нагруженной круглой пластины [3], [8]:

$$\Theta = (3, 14Eh/(1 - m^2)) \int (e_r^2 + e_q^2 + 2m e_r e_q) r dr - T \quad (4)$$

где e_r, e_q – относительная деформация,

T – работа внешних сил, которая находится из выражения [9], [10]:

$$T = P_э \int w r dr \quad (5)$$

где $P_э$ – эквивалентная сила.

В выражении (5) величина прогиба w определяется из следующего выражения [11], [12], [13]:

$$w = 3P_э r_n^2 (1 - r_b^2/r_n^2) / (200D) \quad (6)$$

В случае исследования сплошной круглой пластины, внутренний радиус $r_b=0$. Интегрируя выражение (4) в пределах $0 - r_n$ и подстановки в него выражений (5) и (6) получаем следующее:

$$\Theta = (3, 14Ehr_n^2 (e_r^2 + e_q^2 + 2m e_r e_q) / 2(1 - m^2)) - (3P_э^2 r_n^4 (1 - r_b^2/r_n^2)^2 / (4242D)) \quad (7)$$

Ввиду того, что работа радиальных сил переходит в работу внешних сил и приравняв выражение (7) к нулю с последующим сокращением $r_n^2/2$, получаем:

$$0 = (3, 14Eh(e_r^2 + e_q^2 + 2m e_r e_q) / (1 - m^2)) - (3P_э^2 r_n^2 (1 - r_b^2/r_n^2)^2 / (200D)) \quad (8)$$

Выделив из выражения (8) эквивалентную силу $P_э$ получим выражение для ее расчета:

$$P_э = \sqrt{630EhD(e_r^2 + e_q^2 + 2m e_r e_q) / ((1 - m^2)3r_n^2 (1 - r_b^2/r_n^2)^2)} \quad (9)$$

Обсуждение

Для упрощения расчётов величины прогиба, действие силы закрепления необходимо рассматривать как дополнительную силу, которая действует совместно с силой резания. В этом случае уравнение для расчета величины прогиба будет выглядеть следующим образом:

$$w = (w_0 D - r^2 M_{r0} y_{wr} - r^2 M_{q0} y_{wp} - (P_y r^2 y_{wp} + P_э r^2 y_{wp})) / D \quad (10)$$

где $P_э$ – величина силы закрепления, численно равная силе $P_э$.

Для непосредственных расчетов величины прогиба полотна диска, с использованием выражения (12), эквивалентная сила $P_э$ берется со знаком (+) при действии на полотно сжимающих сил закрепления, а при действии растягивающих сил закрепления со знаком (-) [14], [15].

Для проверки полученных зависимостей были проведены экспериментальные исследования на специально спроектированном стенде (рис. 2). Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований в случае, когда осевая сила $P_0 = 50$ Н приложена в центре полотна диска изготовленного из материала сталь 20

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.7.2>

Радиальная сила, Н	Величина прогиба, мм	«Эквивалентная» сила, Н	Величина прогиба, мм
100	0,23	1,55	0,24
200	0,25	3,1	0,25
300	0,27	4,65	0,27

Полученные данные показали хорошую сходимость расчетных значений и значений, полученных экспериментальным путем (Рис. 3).

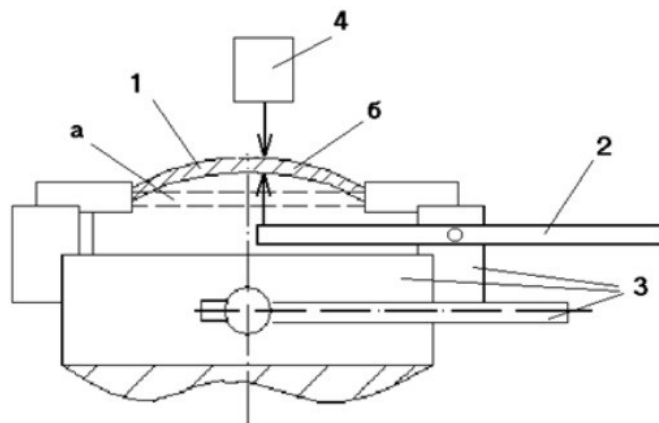


Рисунок 2 - Установка для оценки влияния сил в технологической системе и технологических остаточных напряжений на величину прогиба полотна диска при механической обработке:

1 – исследуемый диск; 2 – механизм нагружения силами в осевом направлении; 3 – механизм нагружения силами в радиальном направлении; 4 – датчик осевых перемещений; а – диск до нагружения; б – диск после нагружения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.7.3>

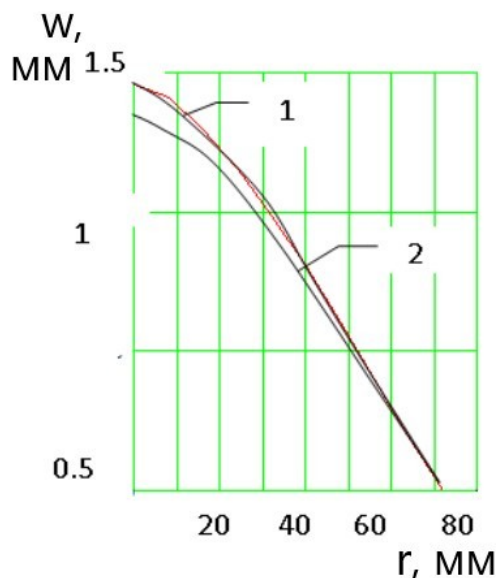


Рисунок 3 - Расчетные (1) и экспериментальные (2) величины прогибов полотна диска при одновременном действии составляющей силы резания P_y и эквивалентной силы P_{Σ} : $P_y = 50$ Н, $P_{\Sigma} = 190$ Н
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.7.4>

Расхождения между экспериментальными данными и результатами расчетов составляли от 1,5% до 6%. Данный показатель характеризует представленную модель замены сил как состоящую и дает возможность ее использовать для проведения необходимых расчетов.

Заключение

В результате выполненной работы были получены базовые уравнения математической модели, которые позволяют установить взаимосвязь между силами в технологической системе и их влияние на величину прогиба полотна диска при механической обработке. Показана возможность замены радиальных сил закрепления на эквивалентную (осевую) силу.

Исследования, проведенные с использованием экспериментального оборудования, позволили установить, что использование такой замены является правомерным. Расчеты величины прогиба полотна диска можно производить с помощью представленных уравнений. Величина погрешности между экспериментальными данными и расчетными значениями составило не более 6%.

Представленная методика позволяет производить прикладные расчеты ожидаемой величины прогиба полотна дисков энергетических машин еще на этапах конструкторской и технологической подготовки производства изделий. Данные расчеты позволят снизить уровень технологических потерь при изготовлении деталей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели: конструкция и расчет / Г.С. Скубачевский. — М.: Машиностроение, 1981. — 550 с.
2. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов [и др.] — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
3. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / В.С. Кушнер. — Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1982. — 180 с.
4. Леонов С.Л. Выбор способа обеспечения точности жестких корпусных деталей / С.Л. Леонов, А.В. Балашов, А.С. Жидецкая // Инновации в машиностроении: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции ИнМаш-2022, Барнаул, 23-25 ноября 2022 года / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. — Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2022. — С. 30-39.
5. Копецкий А.А. Повышение эффективности механической обработки жестких деталей управлением упругими деформациями при их закреплении и обработке / А.А. Копецкий, С.Н. Еськов, В.А. Носенко [и др.] // Взаимодействие предприятий и вузов – наука, кадры, новые технологии: материалы конференции, Волжский, 26-28 апреля 2016 года /

Министерство образования и науки РФ; Администрация Волгоградской области; Администрация городского округа. — Волжский: Волгоградский государственный технический университет, 2016. — С. 40-44.

6. Подгорный А.Н. Основы и методы прикладной теории упругости / А.Н. Подгорный, Г.А. Марченко, В.И. Пустынников [и др.]. — Киев: Вища школа, 1981. — 328 с.

7. Григолюк Э.И. Устойчивость круглых кольцевых пластин / Э.И. Григолюк // Институт механики АН СССР. Инженерный сборник. — М., 1949. — Т. 5. — С. 83-95.

8. Вивденко Ю.Н. Равнодействующая технологических остаточных напряжений в поверхностном слое и ее применение для оценки влияния условий обработки на коробление деталей / Ю.Н. Вивденко // Оптимизация технологических процессов по критериям прочности: Межвуз. сб. — Уфа: УАИ, 1986. — С. 74-81.

9. Нестеренко Г.А. Расчет прогиба полотна диска осевой газоперекачивающей машины / Г.А. Нестеренко, И.С. Нестеренко, А.А. Орлов // Вестник машиностроения. — 2022. — № 11. — С. 64-65. — DOI: 10.36652/0042-4633-2022-11-64-65

10. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1969. — 288 с.

11. Лукасевич С. Локальные нагрузки в пластинах и оболочках / С. Лукасевич. — М.: Мир, 1982. — 544 с.

12. Крутов В.И. Основы научных исследований / В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов [и др.]; под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. — М.: Высш. шк., 1989. — 400 с.

13. Nesterenko G.A. Calculation-experimental method of determining the propensity for warping non-rigid disks of hydraulic machine / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Procedia Engineering: "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". — 2017. — P. 278-283.

14. Nesterenko G.A. Flexure of disk blade in an axial gas pump / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Russian Engineering Research. — 2023. — 43(1). — p. 47-48

15. Вивденко Ю.Н. Влияние износа инструмента на точность токарной обработки нежестких элементов деталей из высокопрочных материалов / Ю.Н. Вивденко // Оптимизация процессов резания жаро- и особопроочных материалов. Межвуз. сб. — УФА, 1986 — с.134-140.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Skubachevsky G.S. Aviacionnye gazoturbinnnye dvigateli: konstrukciya i raschet [Aviation Gas Turbine Engines: Design and Calculations] / G.S. Skubachevskij. — М.: Mashinostroenie, 1981. — 550 p. [in Russian]

2. Kogaev V.P. Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of Machine Parts and Structures for Strength and Durability] / V.P. Kogaev, N.A. Makhutov [et al.] — М.: Mashinostroenie, 1985. — 224 p. [in Russian]

3. Kushner V.S. Termomekhanicheskaya teoriya processa nepreryvnogo rezaniya plastichnyh materialov [Thermo-mechanical theory of the process of continuous cutting of plastic materials] / V.S. Kushner. — Irkutsk: Publishing house of Irkutsk University, 1982. — 180 p. [in Russian]

4. Leonov S.L. Vybora sposoba obespecheniya tochnosti nezhestkih korpusnyh detalej [The choice of a method for ensuring the accuracy of non-rigid body parts] / S.L. Leonov, A.V. Balashov, A.S. Zhidetskaya // Innovacii v mashinostroenii [Innovations in mechanical engineering] : materials of reports of the XIII International Scientific and Practical Conference INMASH-2022, Barnaul, November 23-25, 2022 / Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. — Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2022. — pp. 30-39. [in Russian]

5. Kopetsky A.A. Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki nezhyostkih detalej upravleniem uprugimi deformacijami pri ih zakreplenii i obrabotke [Improving the efficiency of mechanical processing of non-rigid parts by controlling elastic deformations during their fixation and processing] / A.A. Kopetsky, S.N. Eskov, V.A. Nosenko [et al.] // Vzaimodejstvie predpriyatij i vuzov – nauka, kadry, novye tekhnologii [Interaction of enterprises and universities - science, personnel, new technologies] : materials of the conference, Volzhsky, April 26-28, 2016 / Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Administration of the Volgograd region; Administration of the city district. — Volzhsky: Volgograd State Technical University, 2016. — P. 40-44. [in Russian]

6. Podgorny A.N. Osnovy i metody prikladnoj teorii uprugosti [Fundamentals and methods of applied elasticity theory] / A.N. Podgorny, G.A. Marchenko, V.I. Pustynnikov [et al.]. — Kyiv: Vishcha School, 1981. — 328 p. [in Russian]

7. Grigolyuk E.I. Ustojchivost' kruglyh kol'cevyyh plastin [Stability of round ring plates] / E.I. Grigolyuk // Institut mekhaniki AN SSSR. Inzhenernyj sbornik [Institute of Mechanics of the USSR Academy of Sciences. Engineering collection]. — М., 1949. — Vol. 5. — P. 83-95. [in Russian]

8. Vivdenko Yu.N. Ravnodejstvuyushchaya tekhnologicheskikh ostatochnyyh napryazhenij v poverhnostnom sloe i ee primeneniye dlya ocenki vliyaniya uslovij obrabotki na korobleniye detalej [Resultant of technological residual stresses in the surface layer and its application to assess the influence of processing conditions on warping of parts] / Yu.N. Vivdenko // Optimizaciya tekhnologicheskikh processov po kriteriyam prochnosti: Mezhuв. sb [Optimization of technological processes according to strength criteria: Interuniversity collection]. — Ufa: UAI, 1986. — P. 74-81. [in Russian]

9. Nesterenko G.A. Raschet progiba polotna diska osevoj gazoperekachivayushchej mashiny [Calculation of the deflection of the disk blade of an axial gas pumping machine] / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, A.A. Orlov // Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of mechanical engineering]. — 2022. — № 11. — P. 64-65. — DOI: 10.36652/0042-4633-2022-11-64-65 [in Russian]

10. Reznikov A.N. Teplofizika rezaniya [Thermophysics of cutting] / A.N. Reznikov. — М.: Mashinostroenie, 1969. — 288 p. [in Russian]

11. Lukasevich S. Local loads in plates and shells [Lokal'nye nagruzki v plastinakh i obolochkah] / S. Lukasevich. — М.: Mir, 1982. — 544 p. [in Russian]

12. Krutov V.I. Osnovy nauchnyh issledovaniy [Fundamentals of scientific research] / V.I. Krutov, I.M. Grushko, V.V. Popov [et al.]; edited by V.I. Krutov, V.V. Popov. — M.: Higher. school, 1989. — 400 p. [in Russian]
13. Nesterenko G.A. Calculation-experimental method of determining the propensity for warping non-rigid disks of hydraulic machine / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Procedia Engineering: "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". — 2017. — P. 278-283.
14. Nesterenko G.A. Flexure of disk blade in an axial gas pump / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Russian Engineering Research. — 2023. — 43(1). — p. 47-48
15. Vivdenko Yu.N. Vliyanie iznosa instrumenta na tochnost' tokarnoj obrabotki nezhestkih elementov detalej iz vysokoprochnyh materialov [The influence of tool wear on the accuracy of turning non-rigid elements of parts made of high-strength materials] / Yu.N. Vivdenko // Optimizaciya processov rezaniya zharo- i osoboprochnyh materialov. Mezhvuz. sb. [Optimization of cutting processes of heat- and high-strength materials. Interuniversity collection]. — UFA, 1986 — p. 134-140. [in Russian]