

УДК 621.45.037

Степовой М. С. студент-магистр кафедры ТАД Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: stepovyims@gmail.com;
Прибора Т. И. старший преподаватель кафедры ТАД Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: somovatat@meta.ua

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ РАБОЧИХ КОЛЕС ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Цель работы. Проведение анализа конструкции ободной части рабочих колес осевых компрессоров отечественных ГТД для получения возможности успешного усовершенствования конструкции, увеличения надежности и гарантии назначенного ресурса.

Методы исследования. Использован метод математического моделирования объектов исследования. Постановка решения нелинейных задач разной сложности. Максимальная реализация математических моделей с высокой степенью достоверности. Анализ статистики эксплуатации и испытаний.

Полученные результаты. Полученные решения математических моделей конструкций ободной части рабочих колес осевых компрессоров, спроектированных на протяжении 50-ти лет, показали обоснованность их назначенных ресурсов. По мере накопления опыта проектирования и длительного времени эксплуатации ГТД, видоизменялась конструкция в сторону увеличения требуемой надежности работы в процессе назначенных ресурсов. Результаты показывают, какими мероприятиями можно добиться увеличения ресурсов ГТД. Использование легких прочных сплавов, места расположения «критических зон», снижение концентрации напряжений – все это прошло математическое моделирование и это является безусловным доказательством правильности мероприятий по увеличению ресурса объектов исследования.

Научная новизна. Предварительно выполнены расчеты по определению напряженности ободной (замковой) части компрессорных дисков разных форм конструкции в 3D-постановке. На основе выполненных расчетов проведен анализ всех рассмотренных конструкций ободной части РК. Рассмотрены пути модернизации конструкции с целью снижения уровня напряженности для обеспечения гарантированного ресурса. Совокупная работа носит аналитический, сравнительный характер по рабочему состоянию большинства видов ободной части отечественных компрессоров. Представлена концентрированная информация оценки НДС серийных и опытных конструкций.

Практическая ценность. Сравнительные численные расчеты вариантов эволюции конструкции показывают правильность направления развития научного проектирования деталей и узлов ГТД.

Ключевые слова: эксплуатация ГТД; ротор компрессора; замковое соединение; математическая модель; метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Ресурс газотурбинного двигателя является показателем научно-технического уровня проектной конструкторской организации.

На всех этапах создания ГТД ставились требования большого ресурса надежной работы двигателя. При проектировании конструкции ответственные детали подвергались точному анализу, расчетам, испытаниям по определению критических зон (зоны, участки деталей, которые по уровню напряжений и температуры определяют ресурс детали). Каждому периоду истории создания ГТД, начиная с 50-х годов прошлого столетия, характерны свои методы оценки прочности, техническая база расчетов и испытаний [1].

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время для оценки прочности ответственных деталей газотурбинного двигателя лидирующее по эффективности значение приобрело математическое моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов. Данный вариант расчета позволяет численным методом создавать расчетные модели деталей двигателя, учитывать разные величины нагрузок, моделировать испытания, получать максимально достоверные результаты и совершенствовать конструкцию [2].

С момента использования при проектировании АГТД расчетного комплекса ANSYS, все задачи успешного конструирования решались с

применением данного комплекса. Это нашло отражение в публикациях работ по результатам исследований в тематических журналах. В частности, [3], [4] раскрыты дополнительные возможности рассматриваемого расчетного комплекса, использованные при доводке и модификации узлов АД.

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Проведение анализа конструкции ободной части рабочих колес осевых компрессоров АГТД для получения возможности успешного усовершенствования конструкции. Изучение исторического опыта проектирования и использование современных методов расчета являются гарантиями создания успешных изделий.

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе проведен расчетный анализ эволюции конструкции ободной части рабочих колес компрессоров отечественных ГТД.

Практика летной эксплуатации ГТД, большой объем выполненной расчетной работы по-

казал, что критической зоной компрессорных дисков являются основания межпазовых выступов замковой области рабочих колес.

Ротор компрессора первого из отечественных ГТД (АИ-20) представлял собой стальные рабочие колеса, собранные в ротор посадкой с натягом и фиксированные штифтами. Диски рабочих колес были сплошными, без центрального отверстия. Паз под хвостовик лопатки имел малый угол раскрытия, соответственно угол между плоскостью доньшка паза и плоскостью площадки смятия был относительно большим. Этот факт способствовал уменьшению концентрации напряжений в основании межпазового выступа. Как следствие, на представителях данного семейства двигателей не зафиксированы разрушения ободной части дисков компрессоров. Были случаи разрушения штифтов, фиксирующих рабочие лопатки от выдвигания из паза.

Из рис. 1 видно, что концентрация напряжений в ободе компрессорного диска происходит не в основании межпазового выступа, а по грани отверстия под штифты.

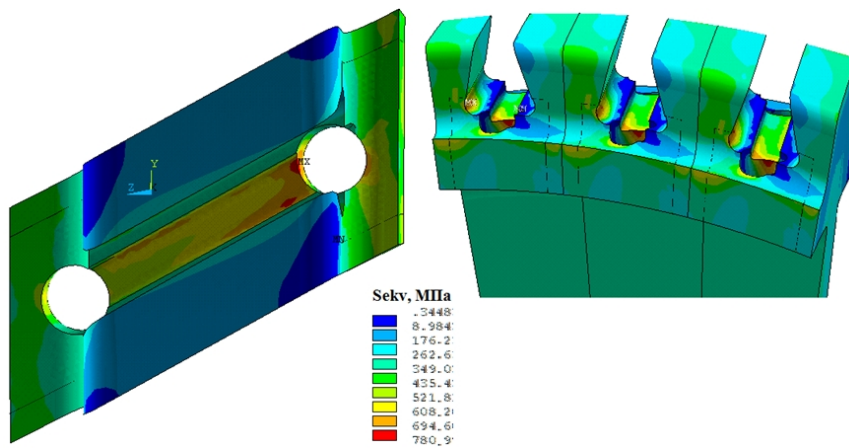


Рисунок 1. Эквивалентные напряжения в ободной части компрессорного стального диска рабочего колеса компрессора авиационного двигателя АИ-20

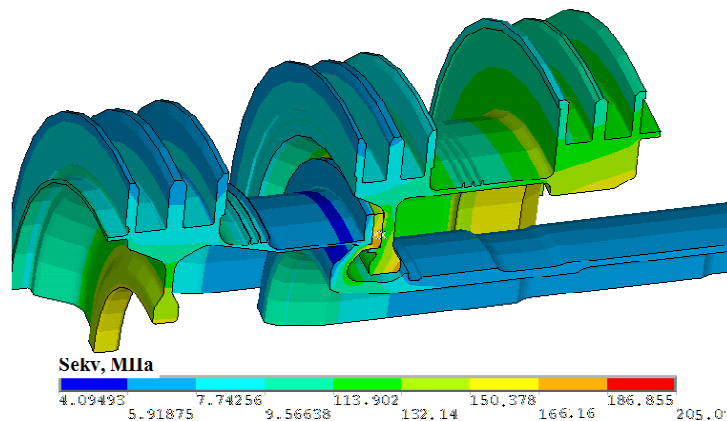


Рисунок 2. Фрагмент ротора КНД с шарнирным соединением рабочих лопаток и дисков ТРДД АИ-25. Напряженно-деформированное состояние

Использование титановых сплавов в конструкции авиационных ГТД привело к развитию новых вариантов замковых соединений компрессорных рабочих колес.

На рис. 2 показан фрагмент ротора КНД авиационного двигателя, следующего по времени разработки семейства отечественных АГТД: турбореактивный двухконтурный двигатель АИ-25. Посадка рабочих лопаток в диск ротора с применением шарнирного соединения возможна исключительно при малых окружных скоростях. В данном случае радиус расположения обода достаточно мал и частота вращения низкая. Ротор успешно работает в составе двигателя без существенных дефектов.

В 70-х годах прошлого столетия в отечественном двигателестроении произошел переход на создание трехвальных, двухкаскадных двигателей. Надо сказать, что данному периоду проектирования характерно использование аналитических методов оценки прочности. Созданные конструкции рабочих колес компрессоров по принципу «ласточкин хвост» успешно эксплуатировались до достижения большого уровня наработки.

Эксплуатация выявила серьезный недостаток конструкции обода рабочих колес (это касается первых ступеней компрессоров с относительно большими рабочими лопатками). При промежуточных ремонтах стали выявляться трещины в основаниях межпазовых выступов (МПВ). Появление трещин представляло опасность обрыва МПВ.

В этот период проектирования ГТД, внедряются новые методы расчетов по оценке прочности, а именно – метод конечных элементов (МКЭ). Появилась универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS, предназначенная для КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия

элементов конструкций), и других задач.

Данный расчетный комплекс существенно облегчает конструирование и расчет деталей, узлов и агрегатов ГТД.

С использованием прогрессивных методов расчета конструкторы смогли модернизировать конструкцию замкового соединения [5]. В следующем поколении ГТД, в двухконтурном двигателе с большой тягой была рассмотрена возможность модификации замкового соединения «ласточкин хвост» путем изменения паза диска проглублением доньшка паза для того, чтобы снять нагрузку с концентратора напряжений и увеличить ресурс и прочность дисков (рис. 3).

Подобный модифицированный профиль паза замка «ласточкин хвост» уверенно применяется при изготовлении роторов компрессоров новых проектируемых авиационных двигателей.

Для рабочего колеса вентилятора и рабочих колес первых ступеней КНД и КВД характерно использование замкового соединения «елочка» в двузубом исполнении. Приведенная выше модификация доньшка паза нашла успешное применение и при исполнении замкового соединения «елочка».

На рис. 4. приводится напряженно-деформированное состояние обода компрессорного диска хвостовика рабочей лопатки модифицированно-го замкового соединения «двузубая елочка».

По результатам прочностных расчетов, рис. 5, можно убедиться в том, что решение углублять доньшко замкового соединения достаточно эффективно [6].

Положительный эффект данной модификации заключается в разведении двух составляющих суммарных (эквивалентных) напряжений в основании межпазового выступа, а именно: радиальных и окружных. Проглублением доньшка мы переводим максимум окружной составляющей эквивалентных напряжений из основания МПВ в середину проглубленного доньшка. Величина эквивалентных напряжений в основании МПВ вследствие этого уменьшается ~ 40...60%.

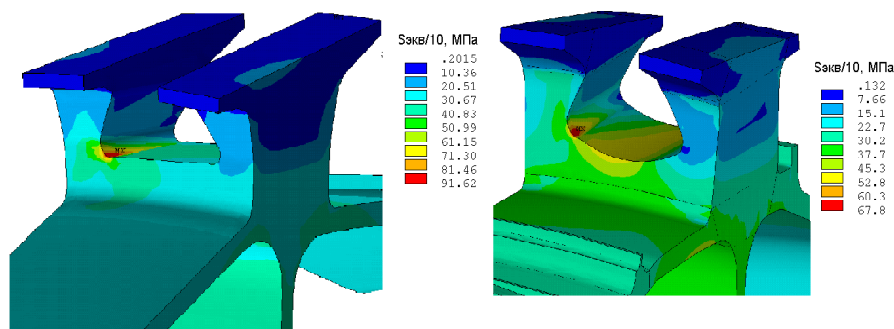


Рисунок 3. Ободная часть компрессорного титанового диска рабочего колеса компрессора исходного профиля (а) и модифицированного профиля (б)

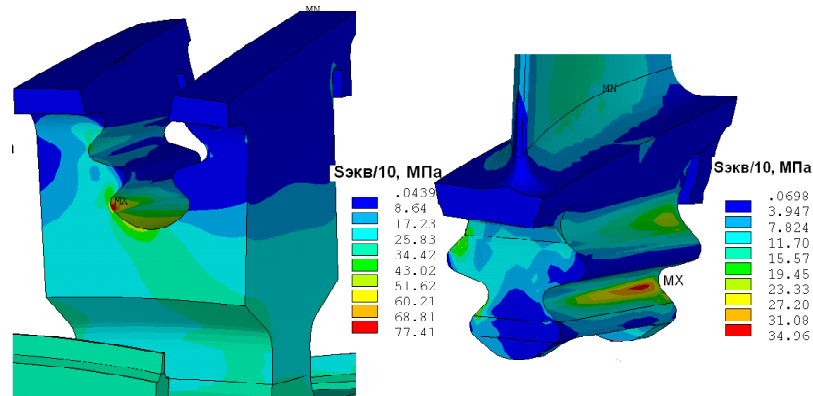


Рисунок 4. Обод диска и хвостовик лопатки замкового соединения «ёлочка»

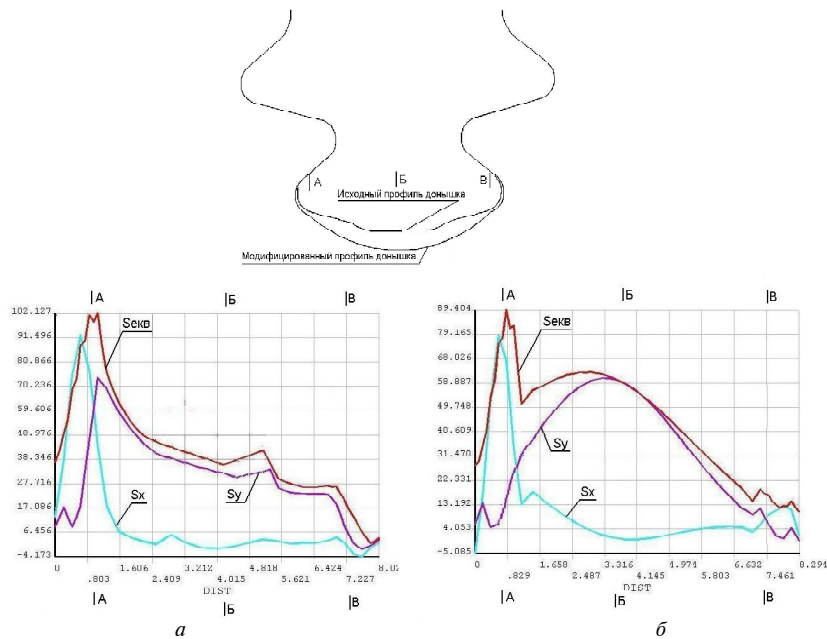


Рисунок 5. Сравнение эквивалентных напряжений в замковом соединении «ёлочка» до модернизации (а) и после (б)

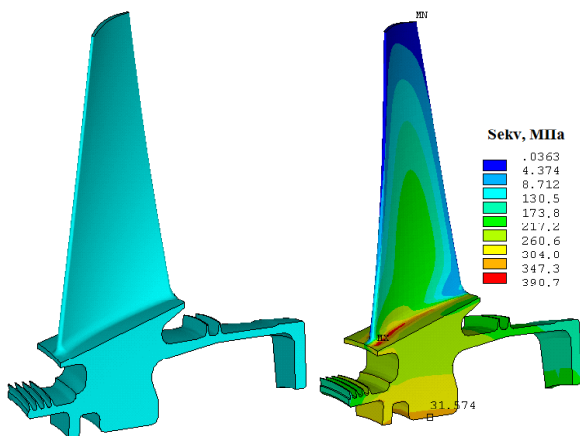


Рисунок 6. Solid- модель и распределение эквивалентных напряжений моноколеса (Blisk)

В последнее время появились так называемые Blisk -технологии (рис.6). Они заключаются в том, что лопатки выполняются или заодно с диском фрезерованием, или перо лопатки соединяется с

диском посредством сварки трением. В «блисках» отсутствует замковая часть рабочего колеса и связанные с ней проблемы (прочность и износ замка).

Конструкции «блисков» обладают минимальным весом. Однако возникают проблемы с эксплуатацией, так как менять дефектные лопатки приходится сваркой трением, либо же изготовлением нового рабочего моноколеса. Сложна и технология изготовления, требующая специального дорогостоящего оборудования. На отечественных двигателях такие технологии успешно применяются и в проектируемых двигателях, и в готовых к эксплуатации.

ВЫВОДЫ

В заключении следует отметить, что задачи увеличения гарантированного ресурса проектируемых отечественных двигателей успешно решаются модернизацией существующих изделий и освоением конструкций «блисков», внедрени-

ем новых технологий изготовления и ремонта. В решении этих задач главная роль отводится отработке конструкции численным методом, на максимально приближенных к реальным математических моделях [7]. При отстройке конструкции расчеты проводятся на различных параметрах, возможных в эксплуатации. При получении требуемых результатов конструкция узла принимается годной к исполнению и проведению натурных испытаний.

Данные приемы проектирования, модификации существующих конструкций на сегодняшний день доказали свою эффективность и надежность [8].

Прогресс научных расчетных разработок в сочетании с творческим талантом конструкторов позволяет создавать конкурентно способную авиационную технику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Муравченко Ф. М. Об особенностях прочностной доводки современных АГТД на заданный ресурс / Муравченко Ф. М., Шереметьев А. В // Авиационно-космическая техника и технология : Сб. научн. тр. – Харьков : – Харьковский гос. аэрокосмич. ун-т, 1999. – Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 5–9.
- [2] Прибора Т. И. Численный эксперимент при прочностной доводке узла крепления диска последней ступени КВД двигателя Д-18Т / Прибора Т. И., Степаненко С. М. // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Производственно-технический сборник. – М. : ЦИАМ, 1992. – № 1. – С. 89–95.
- [3] Денисюк В. Н. Напряженно-деформированное состояние замковых соединений дисков компрессоров ГТД / Денисюк В. Н., Прибора Т. И. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – № 30. – С. 91–95.
- [4] Шереметьев А. В. Анализ использования результатов субмоделирования при определении напряженно-деформированного состояния и ресурса деталей авиационных ГТД / А. В. Шереметьев, Т. И. Прибора, В. В. Тихомиров // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 52–57.
- [5] Прибора Т. И. Обеспечение прочностной надежности авиационных ГТД большой степени двухконтурности / Прибора Т. И., А. В. Шереметьев, В. В. Тихомиров // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 10/117. – С. 61–68.
- [6] Шереметьев А. В. Использование компьютерного моделирования при проектировании дисков компрессоров авиационных ГТД / А. В. Шереметьев, Т. И. Прибора // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 32–35.
- [7] Олейник А. Г. Частные случаи повышения надежности и продления ресурса дисков компрессоров авиационных ГТД / А. Г. Олейник, Т. И. Прибора // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 10. – С. 42–45.
- [8] Денисюк В. Н. Численный эксперимент при оценке напряженности оснований межпазовых выступов дисков компрессоров ГТД. / Денисюк В. Н., Прибора Т. И. Харченко В. Г. // Вестник двигателестроения., – 2003. – №2. – С. 110–114.

Статья поступила в редакцию 21.03.2018

Степовий М. С. студент-магістр кафедри ТАД Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: stepovyims@gmail.com;

Прибора Т. І. старший викладач кафедри ТАД Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: somovatat@meta.ua

АНАЛІЗ ЕВОЛЮЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАМКОВОГО З'ЄДНАННЯ РОБОЧИХ КОЛІС ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРІВ ГТД

Мета роботи. Проведення аналізу конструкції ободної частини робочих коліс осьових компресорів вітчизняних газотурбінних двигунів для отримання можливості успішного удосконалення конструкції, збільшення надійності і гарантії призначеного ресурсу.

Методи дослідження. Використано метод математичного моделювання об'єктів дослідження. Постановка розв'язання нелінійних задач різної складності. Максимальна реалізація математичних моделей з високим ступенем достовірності. Аналіз статистики експлуатації і випробувань.

Отримані результати. Отримані рішення математичних моделей конструкцій ободної частини робочих коліс осьових компресорів, спроектованих протягом 50-ти років, показали обґрунтованість їх призначених ресурсів. По мірі накопичення досвіду проектування і тривалого часу експлуатації газотурбінних двигунів, змінювалася конструкція в бік збільшення необхідної надійності роботи в процесі

призначених ресурсів. Результати показують, якими заходами можна домогтися збільшення ресурсів газотурбінних двигунів. Використання легких міцних сплавів, місця розташування «критичних зон», зниження концентрації напруги - все це пройшло математичне моделювання і це є безумовним доказом правильності заходів щодо збільшення ресурсу об'єктів дослідження.

Наукова новизна. Попередньо виконані розрахунки по визначенню напруженості ободної (замкової) частини компресорних дисків різних форм конструкції в 3D-постановці. На основі виконаних розрахунків проведено аналіз усіх розглянутих конструкцій ободної частини робочих коліс. Розглянуто шляхи модернізації конструкції з метою зниження рівня напруженості для забезпечення гарантованого ресурсу. Сукупна робота носить аналітичний, порівняльний характер робочого стану більшості видів обідної частини вітчизняних компресорів. Представлена концентрована інформація оцінки напружено-деформованого стану серійних та експериментальних конструкцій.

Практична цінність. Порівняльні чисельні розрахунки варіантів еволюції конструкції показують правильність напряму розвитку наукового розвитку проектування деталей і вузлів газотурбінних двигунів.

Ключові слова: експлуатація газотурбінних двигунів; ротор компресора; замкове з'єднання; математична модель; метод кінцевих елементів.

Stepovyi M. S. Student master of the TAE Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: stepovyims@gmail.com;

Pribora T. I. Senior lecturer of the TAE Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: somovatat@meta.ua

DESIGN EVOLUTION ANALYSIS OF ROTOR DISK LOCKING CONNECTION IN AXIAL-TYPE COMPRESSOR OF DOMESTIC GAS TURBINE ENGINES

Purpose. Analysis of the disk rim design of axial compressors of domestic gas turbine engines to obtain the possibility of successful improvement of the design, increase the reliability and guarantee of the assigned service life.

Research methods. The method of mathematical modeling of research objects is employed. Formulation of solutions to nonlinear problems of varying complexity. Maximal realization of mathematical models with high degree of reliability. Analysis of operation and test statistics.

Findings. The resulting solutions of mathematical models of designs of the rim discs axial compressors, designed for 50 years, showed the validity of their assigned service life. In process of accumulation of experience of design and long time of operation of gas-turbine engines, the design towards increase of required reliability of work in process of the appointed resources changed. The results show what measures can be taken to increase the service life of gas turbine engines. The use of light strong alloys, the location of «critical zones» and the reduction of stress concentration - all this has passed mathematical modeling and this is an unconditional proof of the correctness of measures to increase the life of the objects of study.

Scientific novelty. Preliminary calculations were made to determine the stress of the rim (lock) of the compressor disks of different design in 3D setting. On the basis of the carried-out calculations the analysis of all considered designs of a rim part of disks axial compressors is carried out. Ways of modernization of a design for the purpose of decrease of level of tension for providing the guaranteed service life are considered. The total work is a comparative analysis of the working state of many types of rim disks of domestic compressors. The concentrated information on the estimation of stress-strain state of serial and experimental structures is presented.

Practical value. Comparative numerical calculations of the design evolution variants show the correctness of the direction of the scientific development of the design of gas turbine engine parts and components.

Keywords: operation of gas turbine engines; compressor rotor; locking connection; mathematical model; finite element method.

REFERENCES

- [1] Muravchenko F. M., Sheremet'ev A. V. (1999). Ob osobennostyah prochnostnoj dovodki sovremennyh AGTD na zadannyj resurs. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija : Sb. nauchn. Tr.: Har'kov, Har'kovskij gos. ajerokosmich. un-t, Vyp. 9. Teplovyje dvigateli i jenergoustanovki, 5–9.
- [2] Pribora T. I., Stepanenko S. M. (1992). Chislennyj jeksperiment pri prochnostnoj dovodke uzla krepjenja diska poslednej stupeni KVD dvigatelja D-18T. Novye tehnologicheskie processy i

- nadezhnost' GTD. Proizvodstvenno-tehnicheskij sbornik. Moscow : CIAM, 1, 89–95.
- [3] Denisjuk V. N., Pribora T. I. (2002). Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie zamkovyh soedinenij diskov kompressorov GTD. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 30, 91–95.
- [4] Sheremet'ev A. V. Pribora T. I., Tihomirov V. V. (2015). Analiz rezul'tatov ispol'zovanija submodelirovanija pri opredelenii naprjazhenno-deformirovanogo sostojanija i resursa detalej aviacionnyh GTD. Vestnik dvigatelestroenija, 2, 52–57.
- [5] Pribora T. I., Sheremet'ev A. V., Tihomirov V. V. (2014). Obespechenie prochnostnoj nadezhnosti aviacionnyh GTD bol'shoj stepeni dvuh-konturnosti. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 10(117), 61–67.
- [6] Sheremet'ev A. V., Pribora T. I. (2006). Ispol'zovanie komp'juternogo modelirovanija pri proektirovanii diskov kompressorov aviacionnyh GTD. Vestnik dvigatelestroenija, 2, 32–35.
- [7] Olejnik A. G., Pribora T. I. (2005). Chastnye sluchai povyshenija nadezhnosti i prodlenija resursa diskov kompressorov aviacionnyh GTD. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 10, 42–45.
- [8] Denisjuk V. N., Pribora T. I., Harchenko V. G. (2003). Chislennyj jeksperiment pri ocenke naprjazhennosti osnovanij mezhfazovyh vystupov diskov kompressorov GTD. Vestnik dvigatelestroenija, 2, 110–114.