

УДК 629.7.036:539.4

**Канд. техн. наук А. В. Петров, канд. техн. наук А. В. Шереметьев,  
И. В. Хоменко**

*Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА УРОВЕНЬ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОЛЕСАХ АВИАЦИОННЫХ ГТД

*Проведен анализ влияния конструктивных, технологических и газодинамических факторов на уровень динамических напряжений в центробежных колесах авиационных ГТД. Предложены практические методы снижения их динамической напряженности.*

**Ключевые слова:** центробежное колесо, динамические напряжения, резонанс, диффузор, авиационный ГТД, влияющие факторы.

### Введение

Центробежные колеса (ЦБК) современных авиационных ГТД являются сложными динамическими системами, которым присущи сложные геометрия и конструкция, связанность колебаний лопаток и диска, высокий уровень возбуждения колебаний, отсутствие конструкционного демпфирования и др. Все это делает отстройку от опасных резонансов и снижение уровня динамических напряжений в ЦБК сложным процессом при их проектировании и доводке [1–3]. Поэтому обеспечение динамической прочности ЦБК является важной научной и практической задачей.

### Постановка задачи исследования

Возникающие в ходе доводки и при эксплуатации дефекты ЦБК, как правило, имеют усталостный характер и возникают при наличии опасных резонансных колебаний с повышенным уровнем напряжений. Возникновение опасных резонансов с гармониками возбуждения, равными или кратными явным возбудителям (стойки опор корпусов, лопатки диффузора, лопатки направляющих аппаратов и др.). Степень опасности того или иного резонанса определяется тензометрированием, по результатам которого принимается решение об отстройке от конкретного резонанса.

Таким образом, необходимо исследовать влияние факторов, оказывающих основное влияние на динамические напряжения в ЦБК как при колебаниях по первым (лопаточным) формам, так и по высокочастотным формам колебаний, при которых имеют место связанные колебания лопаток и диска ЦБК.

### Влияние основных факторов на вибронпряженность ЦБК

В данной работе приводится анализ влияния

конструктивных, технологических и газодинамических факторов на уровень динамических напряжений в ЦБК, а также практические методы их снижения.

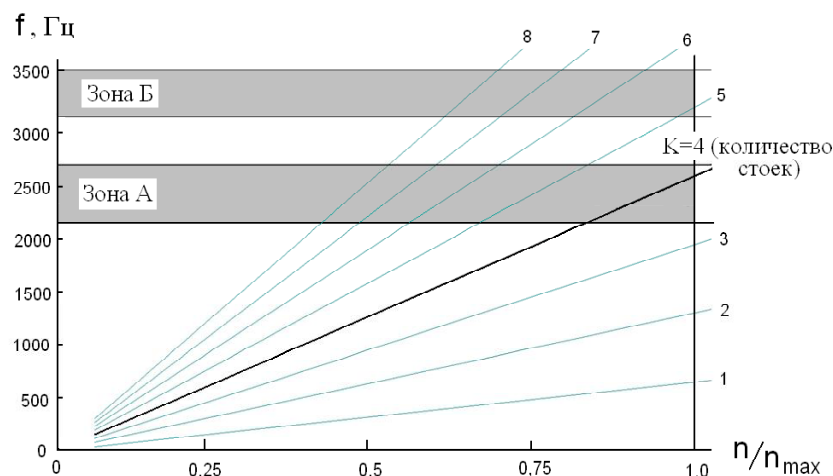
### Влияние точности изготовления лопаток ЦБК

Технологические отклонения формы проточной части лопаток ЦБК приводят в первую очередь к изменению их собственных частот.

В работе [1] установлено, что разночастотность лопаток ЦБК оказывает меньшее влияние на уровень максимальных динамических напряжений в ЦБК по сравнению с аналогичным влиянием для моноколес осевых ступеней, что в первую очередь определяется связанностью колебаний лопаток и диска ЦБК.

Однако, в данном случае, в ЦБК с измененным спектром собственных частот могут возникнуть новые резонансы с повышенным уровнем динамических напряжений, находящиеся в рабочем диапазоне частот вращения и требующие выполнения специальных работ по их устранению.

На рис. 1 приведена резонансно-частотная диаграмма ЦБК, лопатки которого имеют отклонения в сторону уменьшения толщины от ТУ чертежа (зона А), вследствие чего из-за снижения их собственных частот имел место опасный резонанс по первой форме колебаний на взлетном режиме с гармоникой возбуждения  $K = 4$ , равной числу стоек в корпусе. Диапазон собственных частот лопаток колеса, изготовленных в соответствии с ТУ по чертежу представлен на частотной диаграмме зоной Б (рис. 1). При этом в диапазоне рабочих оборотов опасный резонанс отсутствует, а уровень динамических напряжений в ЦБК не достигает опасного уровня.



**Рис. 1.** Резонансно-частотная диаграмма лопаток ЦБК при колебаниях по первой форме: зона А – лопатки с отклонениями по толщине; зона Б – лопатки соответствуют ТУ чертежа

Таким образом, повышение точности изготовления ЦБК и их элементов в сочетании с мероприятиями частотного контроля позволяют обеспечить их бездефектную эксплуатацию.

### Влияние конструктивных доработок геометрии ЦБК

#### Доработка лопаток

При проектировании и доводке ЦБК возможно возникновение резонансных колебаний с повышенным уровнем динамических напряжений по первой основной (лопаточной) форме колебаний с гармоникой возбуждения, равной количеству стоек корпуса на входе. При этом связанность колебаний лопаток и диска ЦБК обычно небольшая. Достаточно близкое расположение собственной частоты лопатки колеса по отношению к гармонике возбуждения представляет определенную опасность для динамической прочности колеса и требует доработки лопатки с целью повышения ее собственных частот и отстройки от опасного резонанса [1, 2].

Путем введения конструктивных доработок в геометрию лопаток необходимо повысить значение собственной частоты выше резонансной частоты с запасом не менее 10%. Как показывает опыт проектирования ЦБК, утолщения корневых сечений лопаток обычно достаточно для того,

чтобы вывести резонанс с высоким уровнем напряжений за пределы рабочих оборотов.

Для устранения опасных резонансов и снижения вибронпряженности ЦБК существуют различные варианты доработок их лопаток, дающие возможность повысить их собственные частоты и вывести резонансы по первым нескольким формам колебаний за пределы рабочего диапазона частот вращения:

- а) обрезка уголков лопаток на входе по линейному закону на величину от нуля в корневом сечении до выбранной величины на периферии;
- б) утолщение лопаток на периферии от входа до места расположения узловой линии на требуемую величину;
- в) утолщение лопаток по высоте в корневой части до нуля на периферии.

Влияние предложенных выше доработок геометрии лопаток на отстройку от резонанса по второй лопаточной форме колебаний с повышенным уровнем динамических напряжений, в процентном соотношении, показано в таблице 1. В указанной таблице приведен пример доработок лопаток ЦБК, на котором имели место повышенные динамические напряжения при колебаниях, вызванных окружной неравномерностью потока, создаваемые 7-ю стойками.

**Таблица 1** – Влияние доработок лопаток ЦБК на их собственные частоты и запас от опасного резонанса

Вариант доработки лопатки	Исходный вариант	Обрезка уголка на 3 мм	Обрезка уголка на 4 мм	Утолщение периферии
Спектр собственных частот, Гц	3101	3235	3293	3315
	5950*	6629*	6901*	6470*
	7428	7743	7871	9277
	10242	11028	11277	12286
Запас по частоте от гармоники $K = 7$ , %	Резонанс	6,4	10,8	3,85

Таким образом, отстройку от опасных резонансов ЦБК при колебаниях по первым нескольким низкочастотным формам колебаний целесообразно проводить путем доработки геометрии лопаток.

### Доработка диска

Связанность колебаний лопаток и диска особенно характерна для высоконапорных центробежных колес относительно большой размерности. В крупногабаритных ЦБК с относительно тонким диском могут возникать резонансные колебания по высокочастотным дисковым формам колебаний с гармониками возбуждения, равными количеству лопаток диффузора. В таких случаях причиной дефектов ЦБК может являться повышенный уровень динамических напряжений, возникающий в результате интенсивных колебаний его ободной части [1, 3].

Отстройка от опасных резонансов и устранение возможных дефектов ЦБК на этапе доводки двигателя вызывают необходимость изменения его конструктивных и газодинамических параметров - в первую очередь геометрии диска, поскольку в случае связанных колебаний доработки геометрии лопаток, как правило, малоэффективны. В данном разделе приведен анализ влияния конструктивных доработок геометрии диска на динамические характеристики и вибронпряженность ЦБК.

В качестве примера рассмотрим исходный вариант конструкции ЦБК с ребордой на диске (рис. 2, а). Исследования частотных характеристик и вибронпряженности исходного ЦБК показывают, что:

- ЦБК представляет собой единую колебательную систему, о чем свидетельствует связанность колебаний лопаток и диска;

- колебания лопаток и диска ЦБК имеют резонансный характер и вызываются гармониками окружной неравномерности потока, а также лопатками диффузора.

- номер гармоники, вызывающей резонансные колебания колеса, равен количеству узловых диаметров резонирующей формы колебаний;
- наибольшие динамические напряжения фиксируются в периферийной части диска.

Рассмотрены два варианта доработки геометрии диска ЦБК – удаление реборды (рис. 2, б) и введение дополнительного бурта для увеличения жесткости ободной части диска (рис. 2, в). Влияние доработок геометрии диска ЦБК на его вибронпряженность показано на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, при колебаниях ЦБК по низким формам, вызываемых окружной неравномерностью потока, уровень динамических напряжений в полотне диска центробежного колеса с обрезанной ребордой снизился более чем на 40 %.

Увеличение жесткости полотна диска позволило повысить значения собственных частот, однако не настолько, чтобы опасный резонанс сместился за пределы рабочего диапазона частот вращения ротора (рис. 4). Для достижения этой цели потребовалось дальнейшее повышение собственных частот ЦБК путем введения бурта для увеличения жесткости ободной части диска.

Выбор формы и радиуса расположения бурта осуществлялся путем выполнения серии конечноэлементных расчетов динамической и статической прочности в трехмерной постановке.

После доработки полотна диска буртом спектр собственных частот колеса достаточно повысился и опасный резонанс с гармоникой возбуждения  $K = 6$  сместился за пределы рабочих частот вращения с запасом по частоте 10 % (рис. 4).

Введение описанных выше конструктивных мероприятий позволяет также существенно снизить уровень максимальных динамических напряжений в ЦБК при резонансных колебаниях по высокочастотным формам с гармониками возбуждения, равными числу лопаток диффузора (рис. 5).

Таким образом, установлено, что доработка геометрии диска является эффективным средством для снижения динамической напряженности ЦБК при связанных колебаниях.

### Влияние параметров диффузора

Опыт проектирования и доводки двигателей показывает, что для повышения динамической прочности ЦБК не всегда достаточно только изменения их конструктивных параметров. При высокочастотных связанных колебаниях доработка геометрии элементов колеса порой оказывает недостаточное влияние на уменьшение вибронпряженности колеса. Например, возможно значи-

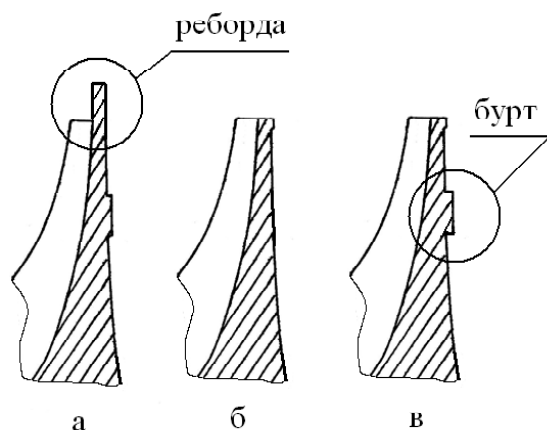


Рис. 2. Варианты конструктивной доработки ободной части диска ЦБК:

а – диск с ребордой (исходный); б – диск без реборды; в – диск без реборды, но с кольцевым буртом

тельное повышение уровня динамических напряжений в элементах ЦБК вследствие срыва потока в диффузоре за колесом. При этом датчиками давления в полости за ЦБК фиксируется повышение статического давления. Возрастающий при этом уровень динамических напряжений является опасным, а наличие статических и динамических напряжений в ЦБК повышенного уровня в сочетании с возможным невысоким пределом выносливости лопаток может служить причиной описанных дефектов ЦБК [3].

Таким образом, в случаях, представляющих сложность снижения вибронапряженности ЦБК конструктивными доработками элементов колеса, целесообразно введение конструктивных и газодинамических мероприятий для диффузора, направленных на уменьшение уровня и характе-

ра возбуждения колебаний, а именно:

- изменение количества лопаток диффузора;
- перепрофилирование лопаток диффузора;
- изменение площадей проходных сечений диффузора;
- применение двухрядного диффузора;
- применение диффузора другой конструкции (например, трубчатого) и др.

#### Устранение источников возбуждения опасных колебаний

В силу значительной связности колебаний лопаток и диска в системе колеса, не всегда представляется возможным изменением геометрии лопаток или диска ЦБК вывести резонансную частоту за пределы рабочих оборотов. В таком случае необходимо полное исключение возмож-

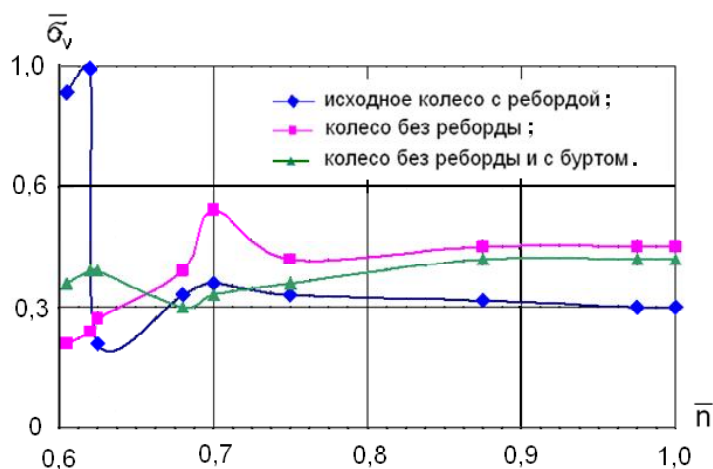


Рис. 3. Влияние конструктивных доработок диска ЦБК на уровень динамических напряжений

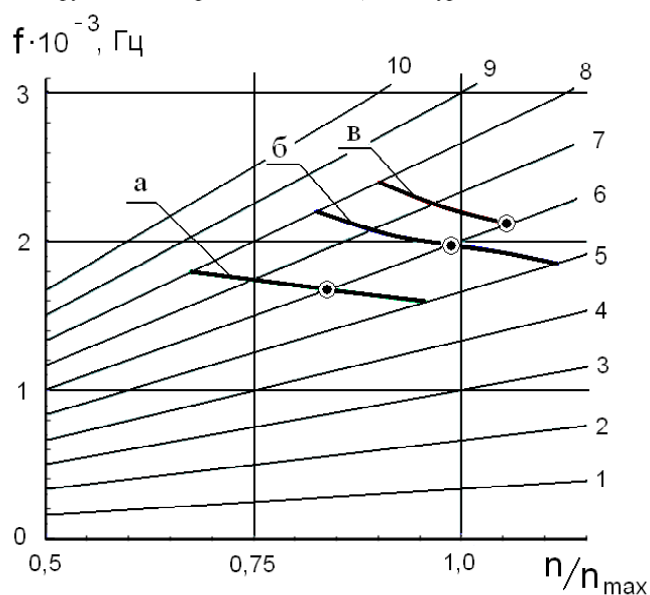


Рис. 4. Резонансно-частотная диаграмма для трех вариантов доработки ЦБК:  
 а — исходное колесо с ребордой; б — колесо без реборды;  
 в — колесо без реборды и с буртом

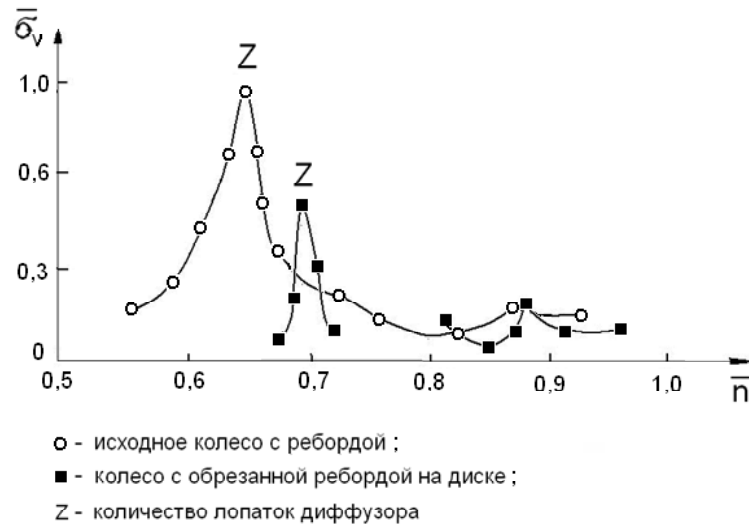


Рис. 5. Зависимость динамических напряжений в диске ЦБК от частоты вращения ротора

ности появления резонансов с повышенным уровнем напряжений в рабочем диапазоне частот вращения. Для этого необходимо убрать опасные гармоники возбуждения путем внедрения корпуса с другим количеством стоек или перепроектированием диффузора, что дает возможность избежать появления повышенного уровня динамических напряжений по данной гармонике возбуждения и устранить причины возможных дефектов ЦБК.

#### Перспективы дальнейших исследований

Поскольку аэродинамические характеристики, возбуждающие силы, характер колебаний, особенности конструкции и уровень динамических напряжений в ЦБК тесно связаны между собой, то для снижения динамических напряжений ЦБК необходимо проводить многокритериальную и междисциплинарную оптимизацию данных параметров — искать компромисс между высокими характеристиками, низким весом, достаточной прочностью и технологичностью. Решение данной задачи предлагается осуществить на основе расчетно-экспериментального анализа кон-

структивных и газодинамических факторов, оказывающих влияние на динамическую напряженность ЦБК путем компьютерного моделирования на основе математических моделей высокого уровня.

#### Перечень ссылок

1. Обеспечение допустимого уровня разночастотности лопаток центробежных колес / [И. Ф. Кравченко, А. В. Шереметьев, А. В. Петров, В. А. Хромов] // Вестник двигателестроения. — 2009. — № 1. — С. 54–57.
2. Resonance Identification for Impellers, Proceeding of the Thirty-second Turbomachinery Symposium / [M. P. Singh, B. K. Thakur, W. E. Sullivan and G. Donald] // Turbomachinery Laboratory, Proceeding of Texas A&M University, 2003. — P. 59–70.
3. Gogoi A. Effect of Impeller-Diffuser Interaction on Centrifugal Compressor / A. Gogoi, D. Prakash // Proceeding of XVIII International Symposium on Air Breathing Engines, ISABE-2007-1225, 2007 — 9 p.

Поступила в редакцию 14.05.2010

#### Петров О.В., Шеремет'єв О.В., Хоменко І.В. Дослідження основних факторів, що впливають на рівень динамічних напружень в відцентрових колесах авіаційних ГТД

Проведено аналіз конструктивних, технологічних та газодинамічних факторів на рівень динамічних напружень у центробіжних колесах авіаційних ГТД. Запропоновані практичні методи зниження їх динамічної напруженості.

**Ключові слова:** відцентрове колесо, динамічні напруження, резонанс, дифузор, авіаційний ГТД, впливаючі фактори.

#### Petrov A., Sheremetyev A., Homenko I. Investigation of the major factors influencing on a level of dynamic stresses in aircraft GTE's impellers

The analysis of influence constructive, technological and gas-dynamic factors on a level of dynamic stresses in aviation GTE's impellers is carried out. Practical methods of decrease in their dynamic stresses are offered.

**Key words:** impeller, dynamic stresses, resonance, diffuser, aircraft GTE, influencing factors.