



Круглий Я. Д.

Институт проблем  
прочности  
имени Г.С. Писаренко  
НАН Украины

Kruglii Ya. D.

G.S. Pisarenko Institute  
for Problems of Strength  
National Academy of  
Sciences of Ukraine

УДК 620.178.5

## ВЛИЯНИЕ ТИПА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СПЕКТР СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБИН

Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению закономерностей влияния типа бандажной полки на характеристики статического напряженного состояния и спектр собственных частот колебаний лопаточных венцов рабочих колес турбин.

**Ключевые слова:** турбина, лопаточный венец, контактное взаимодействие, бандажная полка, собственная частота колебаний.

### **Введение и постановка задачи.**

Полочное бандажирование рабочих лопаток турбин получило широкое применение в современном турбомашиностроении, так как способствует повышению их надежности и работоспособности за счет уменьшения чувствительности к возбуждению колебаний.

В настоящее время при конструировании рабочих лопаток турбин используются Z-образные и беззиговые бандажные полки. Анализ результатов известных исследований [1, 2] показывает, что последние обладают большей надежностью и технологичностью за счет более низких значений напряжений и отсутствия их концентраторов. В работах [3–5] представлены данные исследований влияния параметров бандажирования лопаток на их напряженное состояние. В монографиях [6 – 8] рассматриваются вопросы влияния конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на напряженное состояние бандажированных рабочих лопаток турбин, как необходимого условия анализа их вибрационной прочности. Однако результаты

проведенного анализа показывают, что в настоящее время недостаточно изучено влияние типа бандажной связи на статическое напряженное состояние и спектр собственных частот колебаний лопаточных венцов с учетом их геометрических размеров, что и является целью данной работы.

**Объект исследования и его моделирование.** Для исследования были выбраны два венца из 90 лопаток длиной пера  $L=628$  мм и хордой его концевой сечения  $b=100$  мм, общий вид которых показан на рис. 1. Они различаются типом бандажной полки. Так, лопатки венца 1 имеют Z-образные, а венца 2 – беззиговые бандажные полки. Физико-механические характеристики материала: модуль упругости 1-го рода  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па; плотность – 7800 кг/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона – 0,29.

Рабочие лопатки исследуемых венцов взаимодействуют между собой по контактными поверхностям  $K$  и образуют кольцевую бандажную связь, как показано на рис. 2.

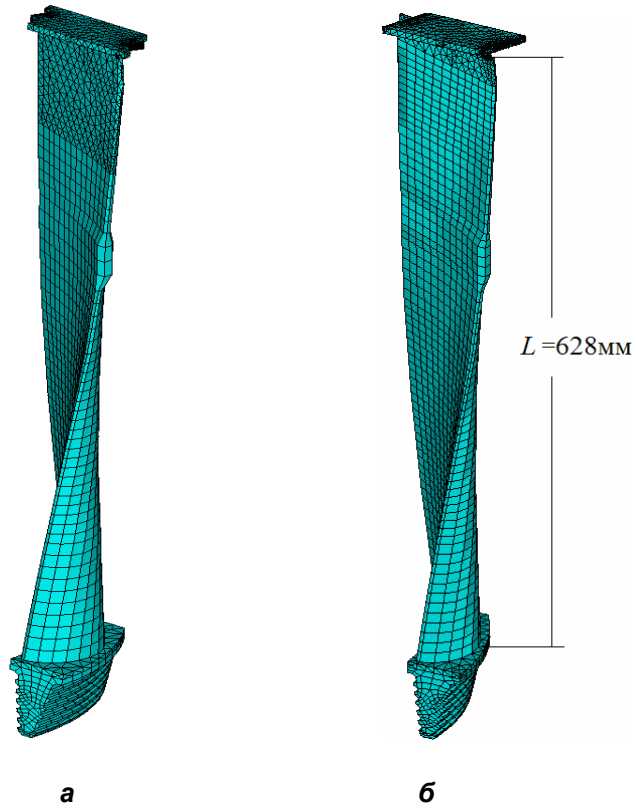


Рис. 1. Общій вид робочих лопаток турбіни венця с Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажными полкой

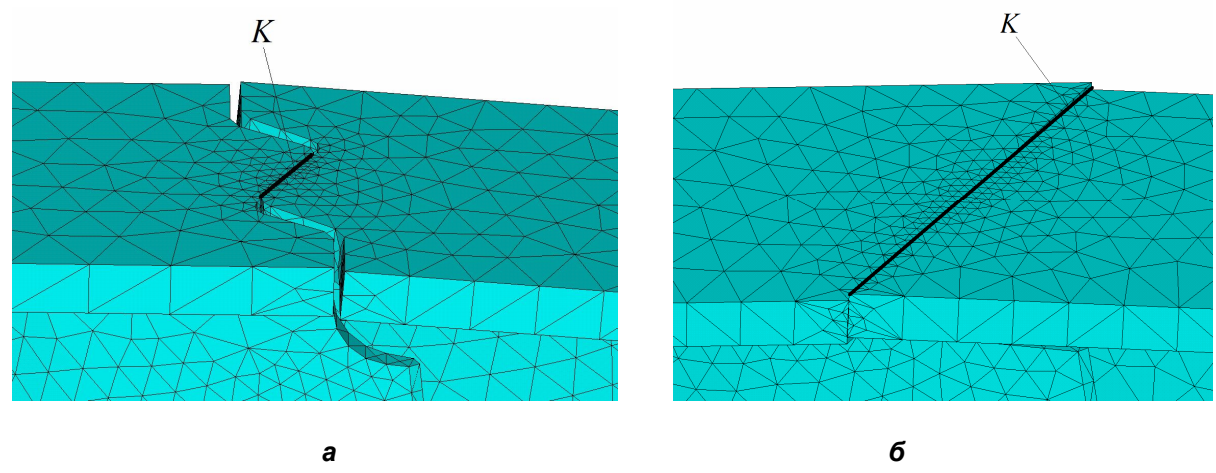


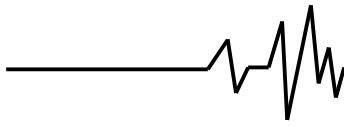
Рис. 2. Схема взаємодії контактуючих поверхностей бандажних полок лопаток венцов 1 (а) и 2 (б)

Вычислительные эксперименты в соответствии с постановкой задачи проводились с использованием метода конечных элементов (МКЭ), на основе подходов, основные положения которых изложены в [5,10,11].

Лопаточный венец представляется как

колебательная система, обладающая строгой поворотной симметрией, период которой в данном случае представляет сектор с углом  $2\pi/N$ , несущий одну лопатку, где  $N$  – число лопаток венца.

Технология сборки венца рабочего колеса предполагает плотное прилегание



контактных поверхностей елочного хвостовика лопатки к соответствующим поверхностям диска, поэтому в качестве граничных условий принималась жесткая заделка по контактным поверхностям елочного хвостовика лопатки в пазах диска. В этом случае, связанность лопаток в замкнутое кольцо обеспечивается только полочным бандажированием.

Для построения конечноэлементных (КЭ) моделей периодов исследуемых венцов был использован линейный 8-узловой конечный элемент SOLID 45 и его модификации, который обеспечивает удовлетворительную точность и высокую скорость расчетов.

Как известно [12], на точность расчетов МКЭ влияет не только тип элемента, но и его размеры. При построении моделей лопаток (рис. 1) более крупные конечные элементы использовались в зонах, где распределение деформаций или напряжений не претерпевает резких изменений, в первую очередь это относится к перу. В зоне бандажного соединения для создания КЭ сетки применялись мелкие элементы с учетом того, что точность результатов расчетов может снизиться, если размеры соседних элементов существенно отличаются. При этом для получения более достоверных результатов не использовались вырожденные конечные элементы.

Учитывая циклическую симметрию рассматриваемых лопаточных венцов, на контактных поверхностях  $K$  бандажных полок использовалась упорядоченная КЭ сетка.

**Результаты вычислительных экспериментов.** В соответствии с отмеченными выше подходами к решению задачи, первым ее этапом был расчет по определению характеристик статического напряженного состояния исследуемых лопаточных венцов, в качестве которых, как и в предыдущих работах [5,11], были выбраны: контактное давление  $P$  по бандажным полкам и интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в полке и пере лопатки, которая определяется по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} \quad (1)$$

где:  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – главные напряжения.

Вычислительные эксперименты проводились с учетом влияния характерных условий эксплуатации, а именно: температуры  $T$  и скорости вращения рабочего колеса  $\omega$ , определяющей уровень центробежных сил. Все расчеты выполнялись в предположении, что

температура  $T$  распределена равномерно по длине пера лопатки.

Рассмотрим результаты вычислительных экспериментов для двух режимов термосилового нагружения: 1 –  $\omega = 0$ ,  $T = 20$  °С; 2 –  $\omega = 50$  Гц,  $T = 200$  °С.

На рис. 3 и 4 приведены распределения контактного давления по полкам и интенсивности напряжений в полке и пере лопатки рассматриваемых венцов при выбранных режимах нагружения.

Как видно из представленных результатов для режима 1 (см. рис.3) максимальные значения выбранных характеристик статического напряженного состояния на порядок выше для лопаточного венца с Z-образными бандажными полками по сравнению с беззиговыми. При этом, несмотря на то, что независимо от типа бандажного соединения, площадки, соответствующие максимальным значениям указанных характеристик, значительно меньше общей площади контактирующих поверхностей, в Z-образной полке они сосредоточены у верхней ее кромки, а в беззиговой смещены к её боковой части.

Анализ данных вычислительных экспериментов, полученных с учетом влияния условий эксплуатации (режим 2) (см. рис. 4) показывает, что в этом случае независимо от типа бандажного соединения наблюдаются как возрастание максимальных значений характеристик статического напряженного состояния, так и увеличение соответствующей им площади контакта.

В целом, следует обратить внимание на то, что если на режиме 1 более напряженным является перо лопатки с Z-образной бандажной полкой, то на режиме 2 наблюдается обратное явление – более напряженным становится перо лопатки с беззиговой полкой. При этом максимальные значения интенсивности напряжений в пере лопаток наблюдаются у его корневого сечения, независимо от вида бандажной полки, о чем уже отмечалось в работах [10,11]. Это свидетельствует о том, что беззиговое соединение бандажных полок для рассматриваемых лопаток является менее жестким, чем Z-образное.

Установленные закономерности изменения характеристик статического напряженного состояния исследуемых лопаточных венцов следует учитывать при изучении их спектров собственных частот колебаний.

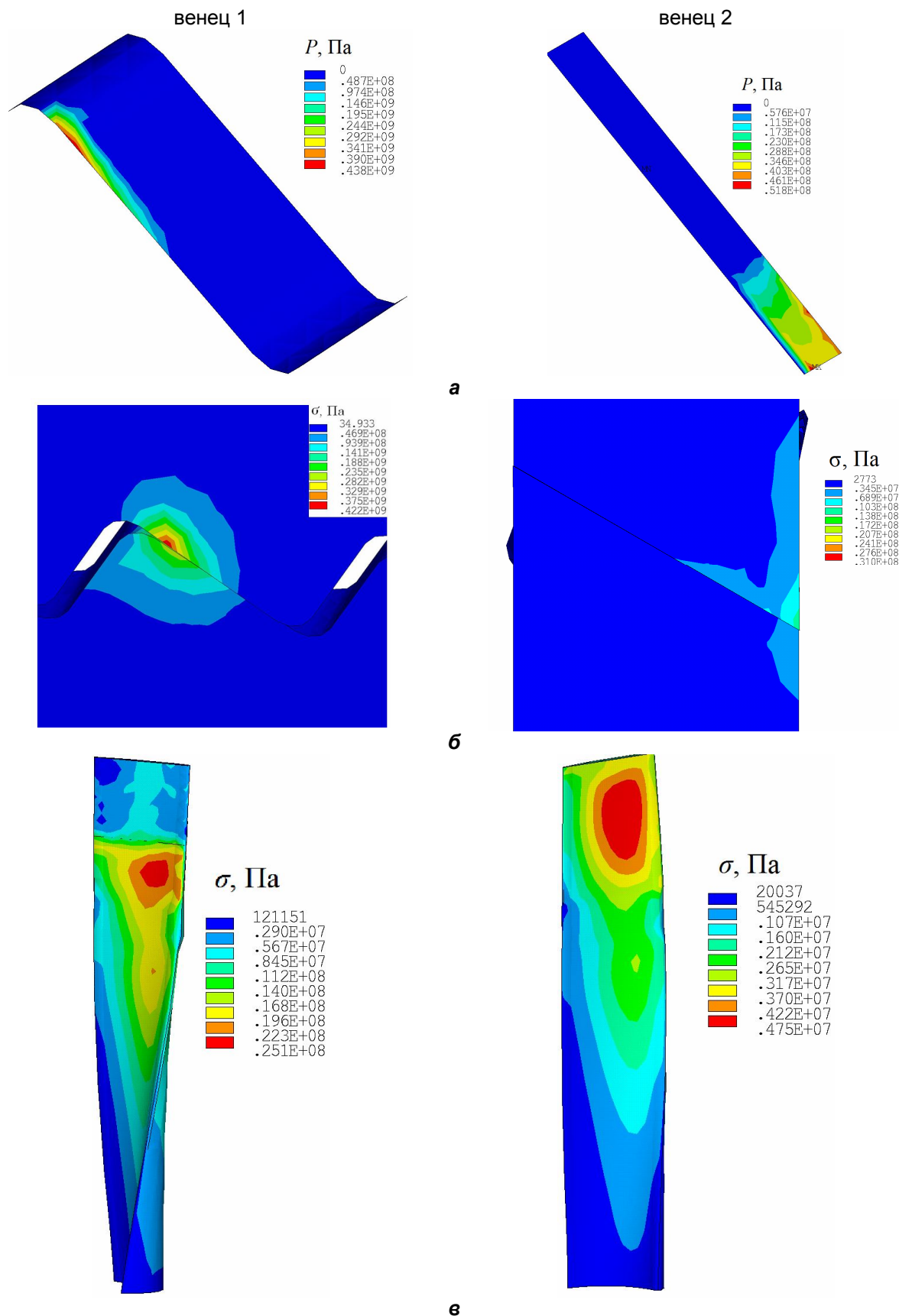
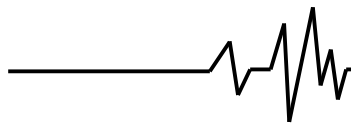


Рис. 3. Распределение контактного давления по полкам (а), интенсивности напряжений в бандажных полках (б) и пере (в) лопаток рассматриваемых венцов при  $\omega = 0$  и  $T = 20^\circ \text{C}$

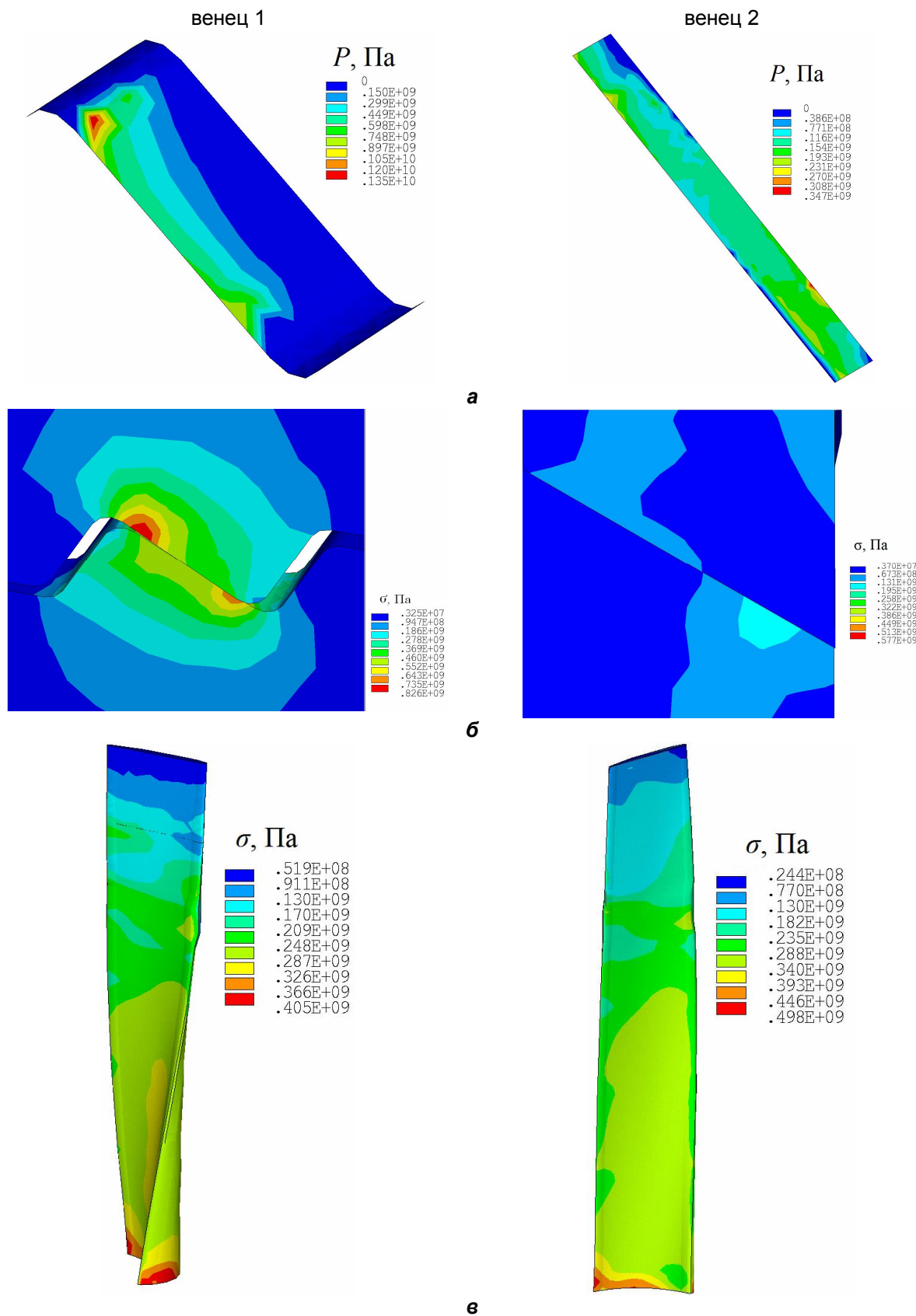
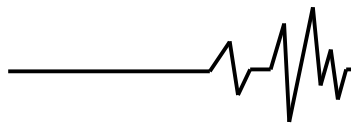
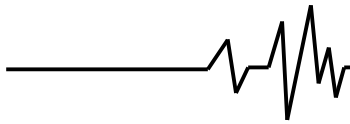


Рис. 4. Распределение контактного давления по полкам (а), интенсивности напряжений в бандажных полках (б) и пере (в) лопаток рассматриваемых венцов при  $\omega=50$  Гц и  $T=200^\circ\text{C}$



Как показано в [5], для рассматриваемых лопаток, учет их контактного взаимодействия по бандажным полкам следует осуществлять путем накладывания условий совместности перемещений на узлы, которые входят в область ненулевых значений контактного давления. Такой подход к моделированию позволяет описать условия взаимодействия в бандажной связи, характерные для состояния, когда смещения контактных поверхностей полок носят развитый характер и учитывает возможность их проскальзывания [6]. Для его реализации, используя результаты решения статической задачи (см. рис.3 и 4, позиция а), были выбраны узлы, для которых характерны

ненулевые значения контактного давления. Далее решалась задача определения спектра собственных частот колебаний исследуемых лопаточных венцов при выбранных режимах нагружения.

Результаты определения собственных частот колебаний представлены в виде частотных функций как зависимостей собственных частот  $f_{mn}$  от числа волн деформации (узловых диаметров)  $m$  по окружности системы, где  $n$  – число узловых окружностей. В данном случае все расчеты проводились для  $n = 0$  в диапазоне изменения числа узловых диаметров  $m = 0..45$  исходя из условия, что  $0 \leq m \leq N/2$ .

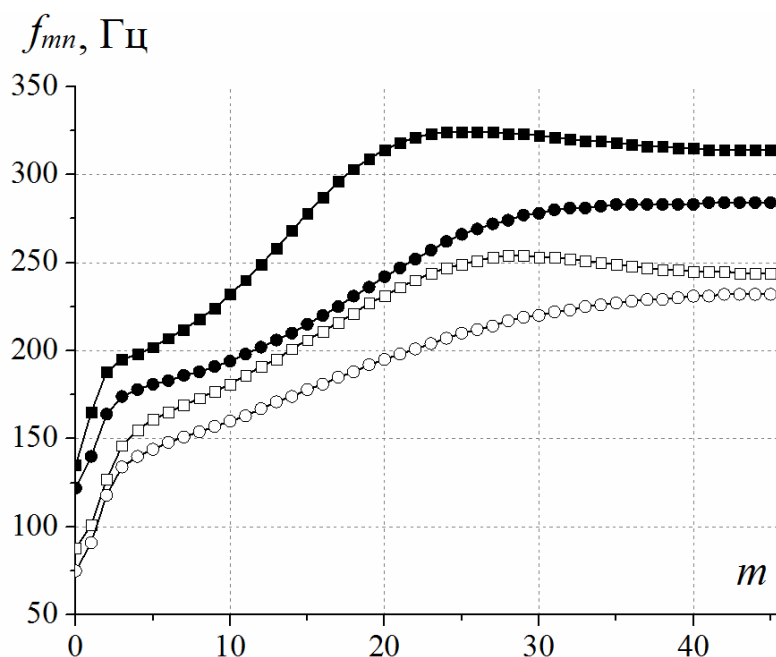


Рис. 5. Частотные функции лопаточных венцов 1 (□) и 2 (○) при  $T=20^{\circ}\text{C}$  и частоте вращения рабочего колеса  $\omega$ , равной 0 (□, ○) и 50 Гц (■, ●)

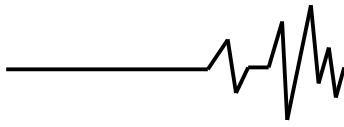
Анализ полученных частотных функций, которые приведены на рис. 5, показывают следующее. Во-первых, характер частотных функций не зависит от типа бандажного соединения. Во-вторых, для венца с Z-образными бандажными полками собственные частоты колебаний во всем диапазоне их изменения превышают таковые для венца с беззиговыми полками. В третьих, в случае Z-образных бандажных полок имеет место более существенное возрастание собственных частот колебаний при учете поля центробежных сил.

**Выводы.** Результаты проведенных вычислительных экспериментов по

определению влияния типа бандажной связи на характеристики статического напряженно-состояния и спектр собственных частот колебаний лопаточного венца показали:

1. Венец с Z-образными бандажными полками имеет более высокие максимальные значения контактных давлений по полкам, а также напряжений в полке и пере лопаток, чем венец с беззиговыми полками;

2. Независимо от типа бандажной связи, при учете поля центробежных сил и температуры наблюдается возрастание всех значений характеристик напряженного состояния лопаток, а также перераспределение их максимальных значений;



3. Для венца с Z-образными полками собственные частоты колебаний, независимо от уровня центробежных сил, существенно выше, чем для венца с беззигвыми полками, что объясняется, по всей видимости, повышением жесткости связи лопаток.

#### Список использованных источников

1. Меркулов В. М., Ильющенко Ф. Д. Разработка бандажированных рабочих лопаток турбин с учетом требований надежности и технологичности // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 86-89.

2. Меркулов В. М., Трипольский С. С., Якушев Ю. В. К выбору параметров бандажной связи рабочих лопаток турбин с беззигвыми полками // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 9(45). – С. 48-51.

3. Придорожный Р. П., Меркулов В. М., Зиньковский А. П. Анализ напряженно-деформированного состояния бандажированных рабочих лопаток турбин АГТД с учетом влияния температуры и нарботки // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 9 (66). – С. 78-82.

4. Fan Jiang, Le Han, Rongqiao Wang, Xiuli Shen, Weiwei Zang, Zhipeng Chang Research on structural design and optimization of the turbine blade shroud // *Proc of ASME Gas Turbine India Conference*. – New York, 2012. – P. 657-663.

5. Zinkovskii A. P. Effect of identity violations of contact interaction between shrouds on the static and dynamic stress state characteristics of blade rings / A. P. Zinkovskii, Ya. D Kruglii // *Strength of Materials*. – 2012. – Vol. 44, № 2. – P. 144-150.

6. Иванов В. П. Колебания рабочих колес турбомашин. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.

7. Воробьев Ю. С. Колебания лопаточного аппарата турбомашин. – Киев : Наук. Думка, 1988. – 224 с.

8. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. – Киев : Наук. думка, 1985. – 264 с.

9. Меркулов В. М., Якушев Ю. В. Влияние технологических параметров изготовления рабочего колеса турбины на силу контактного давления между бандажными полками с плоскими боковыми торцами // *Вестник двигателестроения*. – 2008. – № 3. – С. 154-157.

10. Проблемы теории и практика центробежных машин / Под ред. И.Б. Твердохлеба, А.В. Загорюлько, С.Н.

Гудкова. – Сумы. ООО «Печатный дом «Папирус», 2014. – 418с. – Исследование влияния условий контактного взаимодействия бандажных полок рабочих лопаток турбин на статическое напряженное состояние их венцов / К.В. Савченко, А.П. Зиньковский, Я.Д. Круглий, И.Г.Токарь. – С.386-395.

11. K.V. Savchenko. Influence of the orientation of shroud contact surfaces on the static stress state of turbine rotor blades/ K.V. Savchenko, A. P. Zinkovskii, I.G. Tokar', Ya. D. Kruglii // *Strength of Materials*. – 2014. – Vol. 46, № 4. – P. 493-502.

12. Шереметьев А. В., Петров А. В. Выбор необходимых параметров конечно-элементных сеток при расчетах на прочность лопаток авиадвигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 7 (15). – С. 114-118.

#### Список источников в транслитерации

1. Merkulov V. M., Il'jushhenko F. D. Razrabotka bandazhированных рабочих лопаток турбин s uchetom trebovаний nadezhnosti i tehnologichnosti // *Авиационно-космическая техника i tehnologija*. – 2006. – № 9 (35). – S. 86-89.

2. Merkulov V. M., Tripol'skij S. S., Jakushev Ju. V. K vyboru parametrov bandazhnoy svyazi rabochih lopatok turbin s bezzigovymi polkami // *Авиационно-космическая техника i tehnologija*. – 2007. – № 9(45). – S. 48-51.

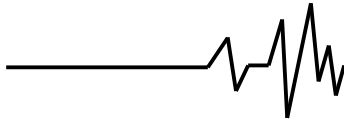
3. Pridorozhnyj R. P., Merkulov V. M., Zin'kovskij A. P. Analiz naprja-zhenno-deformirovannogo sostojanija bandazhированных рабочих лопаток турбин АГТД s uchetom vlijanija temperatury i narabotki // *Авиационно-космическая техника i tehnologija*. – 2009. – № 9 (66). – S. 78-82.

4. Fan Jiang, Le Han, Rongqiao Wang, Xiuli Shen, Weiwei Zang, Zhipeng Chang Research on structural design and optimization of the turbine blade shroud // *Proc of ASME Gas Turbine India Conference*. – New York, 2012. – P. 657-663.

5. Zinkovskii A. P. Effect of identity violations of contact interaction between shrouds on the static and dynamic stress state characteristics of blade rings / A. P. Zinkovskii, Ya. D Kruglii // *Strength of Materials*. – 2012. – Vol. 44, № 2. – P. 144-150.

6. Ivanov V. P. Kolebanija rabochih koles turbomashin. – М.: Mashinostroenie, 1983. – 224 s.

7. Vorobev Ju. S. Kolebanija lopatochnogo apparata turbomashin. – Kiev : Nauk. Dumka, 1988. – 224 s.



8. Matveev V. V. Dempfirovanie kolebanij deformiruemyh tel. – Kiev : Nauk. dumka, 1985. – 264 s.

9. Merkulov V. M., Jakushev Ju. V. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov izgotovlenija rabocheho kolesa turbiny na silu kontaktnogo davlenija mezhdou bandazhnymi polkami s ploskimi bokovymi torcami // Vestnik dvigatelestroenija. – 2008. – № 3. – S. 154-157.

10. Problemy teorii i praktika centrobezhnyh mashin / Pod red. I.B. Tverdohleba, A.V.Zagorul'ko, S.N.Gudkova. – Sumy : OOO "Pechatnyj dom "Papyrus", 2014. – 418 s. – Issledovanie vlijaniya uslovij kontaktnogo vzaimodejstvija bandazhnyh polok rabochih lopatok turbin na staticheskoe naprijazhennoe sostojanie ih vencov / K.V. Savchenko, A.P. Zin'kovskij, Ja.D. Kruglij, I.G. Tokar'. – S. 386 – 395.

11. K.V. Savchenko. Influence of the orientation of shroud contact surfaces on the static stress state of turbine rotor blades/ K.V. Savchenko, A. P. Zinkovskii, I.G. Tokar', Ya. D. Kruglij // Strength of Materials. – 2014. – Vol. 46, № 4. – P. 493-502.

12. Sheremetev A. V., Petrov A. V. Vybor neobhodimyh parametrov konechno-jelementnyh setok pri raschetah na prochnost' lopatok aviadvigatelej // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2004. – № 7 (15). – S.114-118.

**ВПЛИВ ТИПУ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ  
БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ НА  
ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАТИЧНОГО  
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА СПЕКТР  
ВЛАСНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ  
ЛОПАТКОВИХ ВІНЦІВ ТУРБІН**

**Анотація.** *Приведені результати обчислювальних експериментів з визначення закономірностей впливу типу бандажної полиці на характеристики статичного напруженого стану та спектр власних частот коливань лопаткових вінців робочих коліс турбін.*

**Ключові слова:** *турбіна, лопатковий вінець, контактна взаємодія, бандажна полиця, власна частота коливань.*

**INFLUENCE OF THE TYPE OF CONTACT  
INTERACTION BETWEEN SHROUDED  
FLANGES ON THE CHARACTERISTICS OF  
STATIC STRESS STATE AND NATURAL  
FREQUENCY SPECTRUM OF TURBINE BLADE  
ASSEMBLIES**

**Annotation.** *The results of computing experiments are presented for determining the regularities concerning the influence of the shrouded flange type on the characteristics of static stress state and the natural frequency spectrum of turbine rotor blade assemblies.*

**Key words:** *turbine, blade assembly, contact interaction, shrouded flange, natural frequency of vibration.*