

УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН<sup>1</sup>, О.Н. БЫЛИНКИНА<sup>1</sup>, Е.В. БРЫЧЕВА<sup>2</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие РФ  
«Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский, Россия<sup>2</sup>ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн» НТЦ  
им. А. Люльки, Москва, Россия

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ ЛОПАТОК КНД ТРДДФ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА СТЕНДЕ С ВЫДВИЖНЫМ ИНТЕРЦЕПТОРОМ

На основе совместного анализа материалов динамического тензометрирования лопаток вентилятора современного ТРДДФ и параметров возмущенного потока перед ним на стендах с выдвижным интерцептором и лемнискатным входом, а также в стартовых условиях работы на самолете оценена виброчувствительность лопаток к турбулентности. Дан прогноз виброн нагруженности рабочих лопаток всех четырех ступеней вентилятора при их случайных колебаниях, вызываемых этим видом возмущения в полете. Показана возможность взаимного пересчета коэффициентов виброчувствительности лопаток и их виброн нагруженности для различных мест замера переменных напряжений

**лопатки вентилятора, КНД, виброн нагруженность, виброчувствительность, выдвижной интерцептор, турбулентность потока, сверхзвуковой воздухозаборник, стенд, прогноз**

### Введение

Случайные колебания лопаток, вызываемые турбулентностью потока при совместной работе ТРДФ (ТРДДФ) со сверхзвуковыми входными устройствами, один из главных факторов динамического нагружения рабочих колес КНД (вентиляторов) этих двигателей [1 – 3].

Настоящая работа посвящена имитации указанного фактора нагружения при работе двигателя на наземном стенде с выдвижным интерцептором и прогнозированию виброн нагруженности лопаток при их случайных колебаниях в эксплуатации.

### 1. Постановка задачи (условия проведения эксперимента)

Задачами настоящих исследований было:

- подтверждение возможности оценки виброчувствительности лопаток к турбулентности с помощью единого (для стендов и самолета) экспериментально определяемого критерия;
- обоснование методики прогнозирования и вза-

имного пересчета вызываемых турбулентностью переменных напряжений для различных мест их замера на лопатках.

Для оценки влияния турбулентности на динамическое нагружение лопаток использовалась временная неравномерность течения, искусственно создаваемая выдвижным пластинчатым интерцептором, а также естественная неравномерность, возникающая при работе двигателя на самолете и с лемнискатным входом на стенде.

Указанная оценка выполнялась с помощью параметра  $\varepsilon$  [4].

Параметр  $\varepsilon$ , определяемый как относительное значение СКЗ турбулентных пульсаций полного давления на входе в двигатель, рассчитывался в настоящих исследованиях в полосе частот 10...350 Гц. Для его получения выполнялось измерение полей и пульсаций полного давления воздуха. Схема препарировки ВНА двигателя приемниками давления показана на рис. 1.

Переменные напряжения в лопатках и параметр  $\varepsilon$  определялись при отсутствии резонанса лопаток

для режима работы двигателя, близкого к максимальному, с частотой вращения ротора низкого давления  $N_{1\text{физ}} = 93\%$ . Указанный режим позволял существенно изменять интенсивность турбулентности на входе в двигатель без потери его газодинамической устойчивости.

На стенде с интерцептором вибронгруженность рабочих лопаток оценивалась для всех четырех ступеней вентилятора двигателя. В стартовых условиях работы двигателя на самолете, а также при его работе с лемникатным входом на стенде такая оценка выполнялась только для первой ступени КНД. Схемы наземных стендов, на которых проводились эксперименты, показаны на рис. 1.

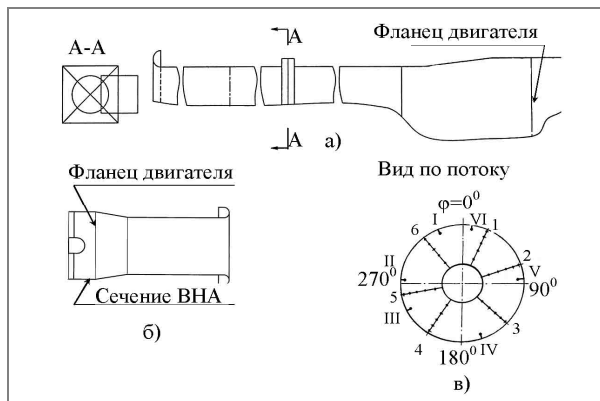


Рис. 1. Схемы стендов с выдвигимым интерцептором (а), с лемникатным входом (б) и прерапарировка ВНА замераи полных давлений воздуха и их пульсаций (в)

Обработка и анализ материалов тензометрирования и параметров возмущенного потока на входе в двигатель при его работе на стендах и самолете выполнялись с помощью программно-аппаратных комплексов по цифровым базам данных. Частота дискретизации при регистрации и обработке переменных тензосигналов с лопаток позволяла исследовать вибропроцессы с частотами до 10 кГц.

## 2. Результаты исследований

**2.1. Вибронгруженность лопаток КНД при возмущениях на входе, создаваемых выдвигимым интерцептором.** Всего на стенде с выдвигимым интерцептором было протензометрировано:

- четыре лопатки I ступени КНД (лопатка №15 на спинке над полкой (шифр замера  $t_1$ ), лопатки №№ 21 и 24 у корня на корыте ( $t_2$ ), лопатка № 30 на корыте у входной кромки ( $t_3$ ));
- две лопатки II ступени ( №№ 25 и 27 у корня на спинке в  $C_{\text{макс}}$  ( $t_4$ ));
- одна лопатка III ступени (№ 45 над полкой на спинке ( $t_1$ ));
- четыре лопатки IV ступени (№№ 20, 21, 28 и 29 у корня на спинке в  $C_{\text{макс}}$  ( $t_4$ )).

В результате исследований выявлен монотонный рост как параметра  $\varepsilon$ , так и переменных напряжений во всех точках их замера на рабочих колесах КНД двигателя по мере выдвигения интерцептора при фиксированном значении  $N_{1\text{физ}} \neq N_{1\text{рез}}$

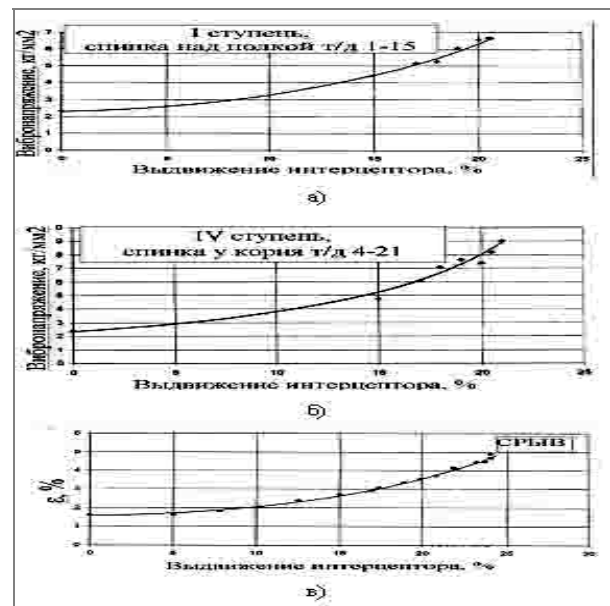


Рис. 2. Графики изменения вибронгруженности лопаток I ступени КНД по замеру в  $t_1$  (а), лопаток IV ступени в  $t_4$  (б) и параметра  $\varepsilon$  (в) от положения интерцептора, использовавшиеся при оценке виброчувствительности лопаток к турбулентности.

В соответствии с теоретическими представлениями о вибрационном отклике систем с высокой добротностью на широкополосное воздействие [2, 5, 6] вибропроцессы в лопатках в проводимом эксперименте носили неустановившийся, случайный, характер. В спектрах указанных процессов отмечено большое число соизмеримых интенсивных состав-

ляющих с частотами не целой кратности к частоте вращения ротора в узкой полосе частот, соответствующей полосе пропускания лопатки как механического резонансного фильтра для каждой из возбужденных форм собственных колебаний.

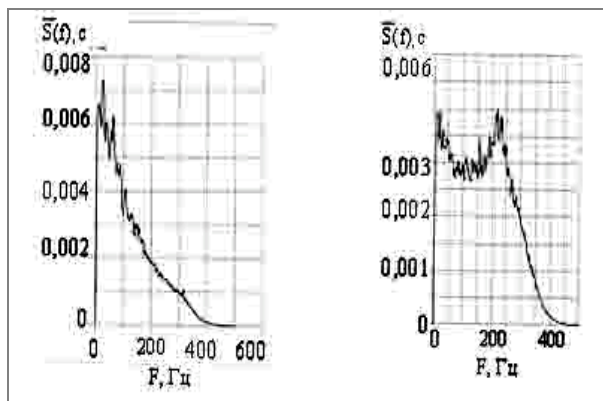


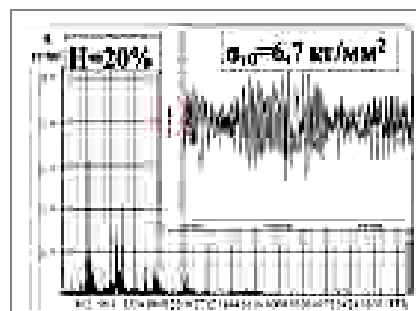
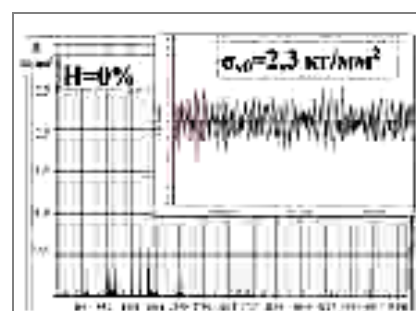
Рис. 3. Нормированная спектральная плотность мощности пульсаций полного давления на входе в двигатель при его работе с  $N_{1p}=93\%$  на стенде с интерцептором ( $H_u = 15\%$ ) (а); в стартовых условиях на самолете (б)

Сказанное иллюстрируется рис. 4, на котором показаны характерные осциллограммы и спектры вибропроцессов в рабочих лопатках I и IV ступеней для крайних ( $H_u = 0$  и  $20\%$ ) положений интерцептора в потоке. Рисунки демонстрируют характер повышения интенсивности вибрационного отклика лопаток в частотной области при максимальном выдвигении интерцептора в поток.

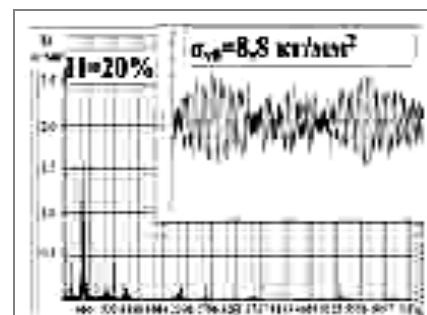
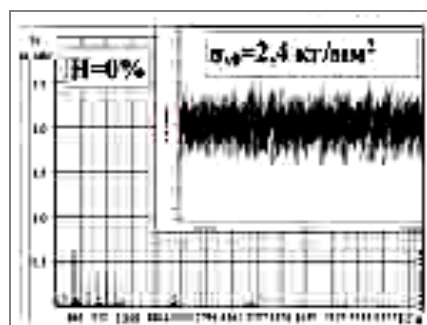
Обращает на себя внимание качественная идентичность вибрационного отклика для первой и всех последующих ступеней КНД, включая четвертую, и то обстоятельство, что усиление интенсивности колебаний для рабочих лопаток всех четырех ступеней отмечено в существенно более широкой полосе нежели диапазон частот  $10 \dots 350$  Гц., которым ограничивались при определении параметра  $\epsilon$ .

Этому можно дать следующее объяснение. Отброшенная при определении параметра  $\epsilon$  высокочастотная часть энергетического спектра турбулентных пульсаций, несмотря на малый и убывающий с ростом частоты уровень, достаточно значима,

чтобы привести к заметному вибрационному отклику лопаток. Сказанное согласуется с работой [6], в которой для определения декрементов колебаний рабочих лопаток компрессора на работающем двигателе авторы успешно пользовались вибрационным откликом лопаток на турбулентные пульсации, интенсивность которых была на уровне шума.



а



б

Рис. 4. Образцы осциллограмм и спектров тензосигналов, замеренных в рабочих лопатках I ступени КНД (а) и IV ступени КНД (б), для крайних положений интерцептора

Как было впервые показано в [2] и подтверждено в [3], спектральная плотность мощности, полученная по замерам турбулентных пульсаций на статоре на входе в компрессор, воспринимается рабочими лопатками I ступени в трансформированном в сторону высоких частот виде в соответствии с отношением  $W/C \approx 2$  ( $W$  и  $C$  относительная и абсолютные скорости обтекания профиля лопатки) при сохранении общей энергии турбулентности.

Поэтому более выраженное усиление интенсивности вибрационного отклика на крупномасштабную турбулентность должно наблюдаться для первых низкочастотных групп форм колебаний лопаток в полосе до 1000 Гц, что мы и видим в спектрах на рис. 4.

Представляется достаточно очевидным, что для лопаток последующих ступеней имеет место дополнительное физическое перераспределение энергии турбулентности потока в область высоких частот. Это происходит за счет «дробления» вихрей по мере их прохождения через очередную решетку профилей.

Можно полагать, что энергия турбулентности при этом по меньшей мере не уменьшается, а экспериментальный закон ее распределения все более приближается к белому шуму. Показанная ниже линейность экспериментальных зависимостей вибрационного отклика от параметра  $\varepsilon$  для рабочих лопаток всех четырех ступеней экспериментально подтверждает предложенное объяснение и столь значимую роль крупномасштабной турбулентности на входе в двигатель в формировании спектра воздействия для всех ступеней КНД.

**2.2. Определение коэффициентов виброчувствительности лопаток к турбулентности по параметру  $\varepsilon$ .** Для увязки вибрационного отклика лопаток на турбулентное воздействие с параметром  $\varepsilon$  использовалась экспериментальная зависимость этого параметра от положения интерцептора в канале (рис. 2, в).

Исключение положения интерцептора  $H_u$  из экспериментальных зависимостей  $\sigma_v = f_1(H_u)$  и  $\varepsilon = f_2(H_u)$  позволило получить зависимости для расчета коэффициентов виброчувствительности лопаток к турбулентности  $K_m$ , так как все они аппроксимируются прямыми, проходящими через начало координат.

Пример расчета значений  $K_T$  для лопаток I и III ступеней в местах замера переменных напряжений  $\tau_1$  иллюстрируется рис. 5, а в табл. 1 представлены значения  $K_m$ , полученные для обследованных мест замера напряжений в лопатках всех четырех ступеней КНД на режиме с  $N_{1физ} = 93\%$ .

На графике экспериментальной зависимости  $\sigma_{v0} = f_3(\varepsilon)$  для I ступени КНД (рис. 5, а), кроме точек, полученных на стенде с выдвигным интерцептором, нанесены и точки, определенные в экспериментах на самолете ( $\varepsilon = 2,5\%$ ) и с лемнискатным входом на стенде ( $\varepsilon = 1,2\%$ ).

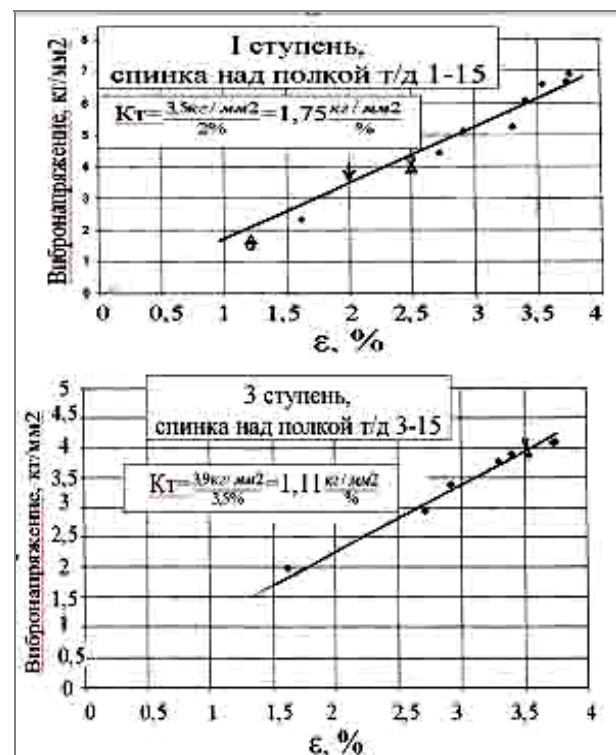


Рис. 5. Иллюстрация расчета коэффициентов виброчувствительности надполочной части (замер  $\tau_1$ ) рабочих лопаток I и III ступени к турбулентности по показаниям тензодатчиков 1-15 и 3-45 ( $N_{1ф} = 93\%$ ,  $N_{1п} = 92\%$ )

Таблица 1  
Коэффициенты виброчувствительности лопаток  $K_m$ , рассчитанные для  $N_{1физ} = 93\%$

Степень КНД	Шифр места замера	Величина $K_m$ , кг/мм <sup>2</sup> /%
I	T <sub>1</sub>	1,75
	T <sub>2</sub>	0,96
	T <sub>3</sub>	0,68
II	T <sub>4</sub>	1,01
III	T <sub>1</sub>	1,11
IV	T <sub>4</sub>	2,27

Как можно видеть из рисунка, добавленные точки в целом соответствуют проходящей через начало координат линии регрессии, полученной для стенда с интерцептором. Указанный факт не противоречит рассматриваемой модели линейного возбуждения случайных колебаний лопаток широкополосной нагрузкой. Таким образом, полученные в эксперименте с интерцептором коэффициенты виброчувствительности лопаток к турбулентности с достаточной для практики точностью можно считать инвариантными для различных стендов и натуральных самолетных каналов.

Из рассмотрения содержания табл. 1 следует, что максимальная виброчувствительность лопаток к турбулентности в обследованных местах замера напряжений в рабочих колесах КНД соответствует надполочной части лопаток I ступени ( $K_m = 1,75$  кг/мм<sup>2</sup>/%) и корневой части лопаток IV ступени ( $K_m = 2,27$  кг/мм<sup>2</sup>/%).

Для другого важного эксплуатационного режима с  $N_{1физ} = 99 - 100\%$  без резонансов лопаток не удалось получить подробные данные о турбулентности потока на входе в двигатель и вибрационном отклике лопаток во всем диапазоне изменения параметра  $\varepsilon$ , как для режима с  $N_{1физ} = 93\%$ . Рис. 6 иллюстрирует расчет коэффициентов виброчувствительности рабочих лопаток I ступени КНД изделия над полкой по датчикам T<sub>1</sub> и в наиболее нагруженном месте корневой сечения у выходной кромки на спинке лопаток (T<sub>5</sub>), выполненный по материалам тензометрирования рабочих лопаток I ступени КНД двигателя при его работе на режиме с  $N_{1физ} = 99\%$  в

компоновке сверхзвукового самолета ( $\varepsilon = 3\%$ ) и с лемнискатным входом на стенде ( $\varepsilon = 1,5\%$ ).

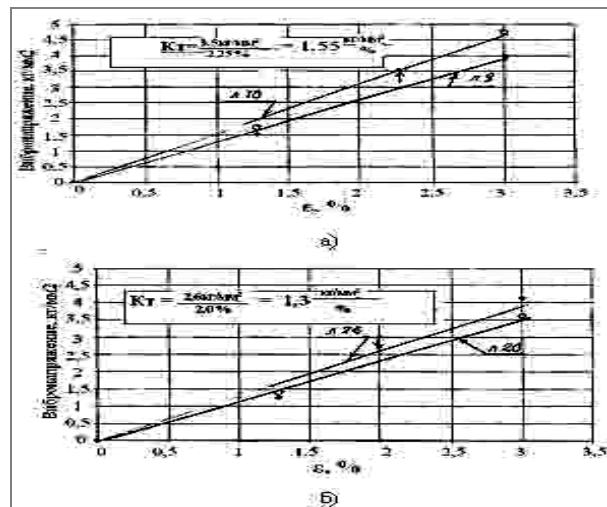


Рис. 6. Иллюстрация вычисления коэффициента виброчувствительности рабочих лопаток I ступени КНД к турбулентности в точках замера T<sub>1</sub> (а) и T<sub>5</sub> (б) по материалам тензометрирования двигателя на стенде с лемнискатным входом и самолете для режима работы двигателя  $N_{1ф} = 99\%$

Как можно видеть из рассмотрения рисунка, и точечная оценка взаимосвязи интенсивности вибрационного отклика лопатки с параметром  $\varepsilon$  не противоречит результатам, полученным по более представительным данным об изменении вибрационного отклика лопаток на турбулентное воздействие. В самом деле, экспериментальные точки, представленные на рис. 5 и 6 также близки к прямым, проходящим через начало координат.

**2.3. Прогнозирование вызываемых турбулентностью переменных напряжений в рабочих лопатках КНД при работе двигателя в условиях полета.** В условиях работы обследуемого двигателя на максимальных (форсажных) режимах с  $N_{1физ} = 93...100\%$  в полете при штатной работе системы регулирования воздухозаборником самолета параметр  $\varepsilon_{с макс}$  (верхний индекс «п» означает полет, а нижний «с» – самолет) не превышает максимальных значений 2...2,5%. При отказе системы автоматического регулирования воздухозаборником (АРВ) в полете величина  $\varepsilon_{с макс}^{отк}$  может достигать значений 6,5...7%.

Выполним прогноз виброн нагруженности лопаток в полете для штатной ситуации и случая отказа системы АРВ при больших числах  $M$  по известным значениям параметра  $\varepsilon_{с макс}^{\text{п}} (\varepsilon_{с макс}^{\text{п отк}})$  и полученным в настоящей работе коэффициентам вибросочувствительности лопаток к турбулентности  $K_m$  (табл. 1).

Прогнозируемые значения вызываемых турбулентностью переменных напряжений в рабочих лопатках КНД ( $\sigma_{vo}$ ) для режимов с  $N_{1\text{физ}} = 93\%$  полученные из соотношения

$$\sigma_{vo}^{\text{п}} = K_m * \varepsilon_{с макс}^{\text{п}} \quad (1)$$

для штатной и отказной ситуаций соответственно составили значения:

- 3,49 и 12,45 кг/мм<sup>2</sup> для лопаток I ступени ( $\tau_1$ );
- 1,92 и 6,72 кг/мм<sup>2</sup> для лопаток I ступени ( $\tau_2$ );
- 1,36 и 4,76 кг/мм<sup>2</sup> для лопаток I ступени ( $\tau_3$ );
- 2,0 и 7,07 кг/мм<sup>2</sup> для лопаток II ступени ( $\tau_4$ );
- 2,2 и 7,8 кг/мм<sup>2</sup> для лопаток III ступени ( $\tau_1$ );
- 4,54 и 15,89 кг/мм<sup>2</sup> для лопаток IV ступени ( $\tau_4$ ).

Результаты прогноза свидетельствуют о приемлемости виброн нагруженности лопаток КНД в полете при штатной работе системы АРВ и об опасности отказа этой системы при больших числах  $M$  полета для вибрационной прочности корневого сечения рабочих лопаток IV ступени.

Оценим максимальную ожидаемую виброн нагруженность лопаток I ступени КНД в условиях полета для режима с  $N_{1\text{физ}} = 99 - 100\%$  в наиболее нагруженном (по расчетам и материалам стендового тензометрирования разработчика) месте корневого сечения у выходной кромки на спинке лопаток (шифр  $\tau_5$ ).

Принимая во внимание, что в этом месте замера величина  ${}^{99}K_m = 1,3 \text{ кг/мм}^2/\%$  (рис. 6, а) при штатном функционировании системы АРВ в полете и в случае ее отказа при максимальных числах  $M$  полета соответственно имеем:

$$\sigma_{vo}^{\text{п}} = {}^{99}K_m * \varepsilon_{с макс}^{\text{п}} = 1,3 \text{ кг/мм}^2/\% * 2,5\% = 3,25 \text{ кг/мм}^2;$$

$$\sigma_{vo}^{\text{п отк}} = 1,3 \text{ кг/мм}^2/\% * 7,0\% = 9,1 \text{ кг/мм}^2.$$

#### 2.4. Обоснование и апробация методики взаимного пересчета виброн нагруженности лопаток КНД в различных местах замера напряжений по результатам ограниченного тензометрирования.

Линейность зависимостей вибрационного отклика лопаток на турбулентное воздействие и прохождение линий регрессии указанных зависимостей через начало координат для всех обследованных точек замера переменных напряжений в рабочих лопатках КНД позволяют получить для них коэффициенты взаимного пересчета коэффициентов вибросочувствительности лопаток и напряжений.

Нетрудно показать, что искомый коэффициент пересчета  ${}^{j-i}K_n$  значений  $K_m$  вибрационного отклика  $\sigma_{vo}$  в месте замера  $j$  в место его замера  $i$  определяется простым соотношением

$${}^{j-i}K_n = {}^iK_m / {}^jK_m = {}^i\sigma_{vo} / {}^j\sigma_{vo}. \quad (2)$$

В частности,

$${}^iK_m = {}^{j-i}K_n * {}^jK_m; \quad (3)$$

$${}^i\sigma_{vo} = {}^{j-i}K_n * {}^j\sigma_{vo}. \quad (4)$$

Использование соотношений (1)...(4) позволяет повысить эффективность исследований виброн нагруженности лопаток КНД авиационных ГТД на стенде и самолете для режимов с повышенной турбулентностью потока на входе.

В табл. 2 приведены коэффициенты пересчета  ${}^{j-i}K_n$  значений  ${}^jK_m$  ( ${}^j\sigma_{vo}$ ) в надполочной части лопаток I ступени (индекс  $j$  – соответствует месту замера  $\tau_1$ ) на соответствующие значения  ${}^iK_m$  и  ${}^i\sigma_{vo}$  во всех обследованных на стенде с интерцептором точках замера переменных напряжений в КНД для режима двигателя с  $N_{1\text{физ}} = 93\%$ .

Таблица 2

Коэффициенты пересчета величин  $K_m$  и  $\sigma_{vo}$ , полученные для I ступени в  $\tau_1$ , на другие места замера

№ ступени	I	II	III	IV
Место замера	$\tau_2$ $\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_1$	$\tau_4$
Величина $K_n$	0,55    0,39	0,58	0,64	1,3

С помощью указанных коэффициентов были рассчитаны переменные напряжения в рабочих лопатках I, II, III и IV ступеней, вызываемые турбулентностью потока перед двигателем на режиме с  $N_{1\text{физ}} = 93\%$  при его работе на самолете по замеру переменных напряжений только в месте  $\tau_1$  для рабочих лопаток I ступени КНД.

Максимальное (по располагаемой выборке лопаток) значение вибрационного фона в указанном месте замера на соответствующем режиме работы двигателя в стартовых условиях самолета составило величину  $4,88 \text{ кг/мм}^2$ . Воспользовавшись соотношением (4) и данными таблицы табл. 2, имеем:

- $2,7 \text{ кг/мм}^2$  для лопаток I ступени (замер  $\tau_2$ );
- $1,9 \text{ кг/мм}^2$  для лопаток I ступени ( $\tau_3$ );
- $2,8 \text{ кг/мм}^2$  для лопаток II ступени ( $\tau_4$ );
- $3,1 \text{ кг/мм}^2$  для лопаток III ступени ( $\tau_1$ );
- $6,34 \text{ кг/мм}^2$  для лопаток IV ступени ( $\tau_4$ ).

Подчеркнем, что все вышеуказанные значения переменных напряжений получены для мест на рабочих колесах всех четырех ступеней КНД, которые не подвергались тензометрированию на самолете.

### Заключение

Существование единого (для стендов и самолета) экспериментально определяемого критерия оценки вибросенситивности лопаток к турбулентности позволяет рассматривать наземный стенд с выдвижным в поток интерцептором в качестве эффективного инструмента для имитации и прогнозирования вызываемой турбулентностью вибронгруженности лопаток КНД нового поколения авиадвигателей. Крупномасштабная турбулентность потока воздуха на входе в двигатель – значимый фактор динамического нагружения лопаток для всех ступеней КНД ТРДФ (ТРДДФ).

### Литература

1. Коровин Б.Б. Оценка нагружения элементов конструкции ГТД в условия полета / В кн. Летные испытания газотурбинных двигателей; под ред. Г.П. Долголенко). – М.: Машиностроение, 1983. – С. 83-91.
2. Коровин Б.Б. Идентификация аэроупругих явлений в лопатках турбомашин методами спектрального анализа // Аэроупругость турбомашин. – К.: Наук. думка. – С. 159-168.
3. Исследование колебаний лопаток компрессора, возбуждаемых случайными пульсациями потока / В.А. Кулагина, Б.Б. Коровин, В.П. Максимов, Н.А. Набатова, А.Я. Родов // Аэроупругость лопаток турбомашин. Труды ЦИАМ. – 1981. – № 953. – С. 166-181.
4. Коровин Б.Б., Колотников М.Е., Кудашин В.С. К выбору представительного эксплуатационного параметра для прогнозирования вибронгруженности лопаток вентилятора, вызываемого турбулентностью потока в ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9 (25). – С. 173-180.
5. Случайные колебания / Под ред. С.Кренделла. – М.: Мир, 1967. – 340 с.
6. Whitehead. M.A., Mech A.M.I., Ae S. Cambridge University Engineering Laboratory. The Analysis of Blade Vibration due to Random Excitation // Aeronautical research council report and memoranda. – London: Her Majesty stationary office. – 1962. – P.16

*Поступила в редакцию 23.05. 2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.Е. Колотников, ФГУП «ММПП «Салют», Москва, Россия.