

## АЭРОДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ЛОПАТОК ГТД

В последнее время для изготовления лопаток компрессоров ГТД применяют полимерные композиционные материалы (КМ). Их специфические свойства оказывают существенное влияние на вибрационные характеристики лопаток. Высокая плотность спектра частот лопаток из КМ, связанность собственных форм и широкий диапазон возбуждающих нагрузок способствуют возникновению опасных резонансных колебаний. Поэтому обеспечение вибропрочности лопаток является важной и актуальной задачей.

Одним из эффективных методов борьбы с вибрационными поломками является частотная отстройка, которую для композитных лопаток можно осуществить путем изменения структуры армирования. При этом необходимо следить за изменением других характеристик, и в частности за уровнем аэродемпфирования, доля которого в общем балансе ввиду малой плотности КМ может быть значительной. Однако данные о влиянии структуры армирования на аэродемпфирование лопаток при колебаниях по различным формам в литературе отсутствуют.

Здесь исследуется влияние различных факторов на аэродинамическое демпфирование лопаток из КМ при колебаниях по различным формам, которое приближенно оценивается расчетным путем на основе нестационарной теории /1-3/. При этом рассматриваются малые гармонические колебания одиночного профиля постоянного прямоугольного сечения в плоском потоке и пренебрегается изменением скорости потока по длине лопатки. В работе рассматривается влияние относительных размеров  $c=a/b$  и  $\bar{h}=h/a$ , форм колебаний  $i, j$ , степени и характера анизотропии и неоднородности материала на аэродемпфирование пластин и стержней из различных полимерных и металлических композитных материалов. Дано сравнение декремента пластин из КМ и металла (стали, титановые и алюминиевые сплавы).

Для пластин постоянного сечения декремент изгибных  $\delta_{i0}$  и крутильных  $\delta_{i1}$  колебаний при нулевом угле атаки приближенно можно оценить по формулам /4/

$$\begin{aligned} \delta_{i0} &= \pi^2 \rho_0 V F (\bar{\kappa}_{i0} \chi \rho h \omega_{i0})^{-1}; \\ \delta_{i1} &= 3 \pi^2 \rho_0 V P (\bar{\kappa}_{i1}, \alpha) (\rho h \omega_{i1})^{-1}, \end{aligned} \quad (I)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  - плотность обтекающего профиля потока и материала пластины соответственно;  $\omega_{i0}$ ,  $\omega_{i1}$  - угловая частота соответственно изгибных и крутильных колебаний по  $i$ -й собственной форме;  $F(\bar{K})$  - действительная часть функции Теодорсена;  $P(\bar{K}, \varepsilon)$  - функция, зависящая от  $F(\bar{K})$ , коэффициента мнимой части функции Теодорсена  $G(\bar{K})$  и  $\varepsilon = z/\delta$ ;  $z$  - расстояние от передней кромки до оси, относительно которой происходят крутильные колебания;  $\delta$  - полухорда профиля;

$\bar{K} = \frac{\omega \delta}{V}$  - число Струхала.

Аэродемпфирование при колебаниях по пластиночным формам, характеризующимся изгибом вдоль хорды, определяется зависимостью, аналогичной зависимости (1) для  $\sigma_{i0}$ , но с учетом  $\omega_{i2}$ .

Для прямоугольного профиля  $\varepsilon = 1$ , а функции  $F(\bar{K})$  и  $P(\bar{K}, 1)$  приведены в работах [1, 4]. Причем  $F(\bar{K} < 0,1) = P(\bar{K}, 1) = 1,0$ ,  $F(\bar{K} > 0,5) \approx 3P(\bar{K}, 1)$ ,  $F(\bar{K} > 2) = 0,5$  и  $P(\bar{K} > 2, 1) = 0,17$ . Учитывая, что  $\omega_{ij} = \bar{\omega}_{ij} h a^{-2} (b_{ij}/h)$  где  $\bar{\omega}_{ij}$  - безразмерная частота колебаний;  $B_{11}$  - модуль упругости материала в направлении оси пластины, перпендикулярной заделке, получим

$$\sigma_{ij} = \pi^2 \rho_0 V F(\bar{K}_{ij}) 2\sqrt{3} (B_{11} \rho)^{0,5} \bar{\omega}_{ij} (a^2/h^2);$$

$$\sigma_{i1} = 6\sqrt{3} \pi^2 \rho_0 V P(\bar{K}_{i1}, 1) a^2 h^{-2} (B_{11} \rho)^{0,5} \bar{\omega}_{i1}^{-1}, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, \dots$  - номер формы;  $j = 0, 2$  - тип формы колебаний ( $j = 0$  - изгибные,  $j = 1$  - крутильные,  $j > 2$  - пластиночные формы). Соотношения между декрементами колебаний по изгибным, крутильным и пластиночным формам имеют вид

$$\alpha_i = \sigma_{i1} / \sigma_{i0} = 3P(\bar{K}_{i1}, 1) \bar{\omega}_{i0} / F(\bar{K}_{i0}) \bar{\omega}_{i1};$$

$$\beta_i = \sigma_{i2} / \sigma_{i0} = F(\bar{K}_{i2}) (\bar{\omega}_{i0}) / F(\bar{K}_{i0}) \bar{\omega}_{i2}. \quad (3)$$

Безразмерные собственные частоты колебаний лопаток определяются на основе уточненной и классической теории пластин и стержней. В соответствии с уточненной теорией [5] предполагается, что в общем случае материал обладает одной плоскостью упругой симметрии и подчиняется закону Гука. Учитываются эффекты от поперечного сдвига, нормального обжатия и инерции вращения. Причем проскальзывание слоев отсутствует. Законы изменения перемещений  $U_{\mu}$  и поперечных напряжений  $\sigma_{\mu z}$  по толщине пластины принимаются в виде

$$U_{\mu}(x, y, z, t) = u_{\mu}(x, y, t) + f_{\mu}(z) \varphi_{\mu}(x, y, t);$$

$$\varphi_{\mu}(x, y, z, t) = \varphi_{\mu}(z) P_{\mu}(x, y, t) \quad (\mu = 1, 2, 3).$$

Соотношения упругости получаются на основе вариационного принципа Гамильтона. Решение задачи о свободных колебаниях пластин сводится на основе принципа возможных перемещений к алгебраической проблеме собственных значений  $AX = \rho^2 BX$ .

В качестве координатных функций применяются соответствующие полиномы, ортонормированные на соответствующих интервалах и удовлетворяющие кинематическим граничным условиям. Собственные значения и собственные векторы вычисляются с помощью разложения Халецкого с последующим применением метода Якоби и восстановлением собственных векторов:

$$B = VV^T; \quad V^{-1}AV^T = \rho IZ; \quad V^T X = Z.$$

Согласно классической теории Кирхгоффа /6/

$$\bar{\omega}_{i0} = \pi^2 G_x^{-4}(i); \quad \bar{\omega}_{i1} = \pi^2 (G_x^{-4} + 4C^2 \bar{B}_{66} J_x J_y)^{0,5};$$

$$\bar{\omega}_{i2} = \pi^2 [G_x^{-4} + 2C^2 (\nu_2 H_x H_y + 2\bar{B}_{66} J_x J_y) + C^4 \bar{B}_{22} G_y^4]^{0,5}, \quad (4)$$

где  $G_x$ ,  $H_x$ ,  $J_x$  и  $G_y$ ,  $H_y$ ,  $J_y$  - коэффициенты, зависящие соответственно от номера  $i$  и типа формы  $j$ ;  $\bar{B}_{22} = B_{22}/B_{11}$  и  $\bar{B}_{66} = B_{66}/B_{11}$  - относительный модуль упругости соответственно при изгибе в направлении хорды и при кручении;  $\nu_2$  - коэффициент Пуассона.

Относительный декремент колебаний стержней из различных материалов, обусловленный аэродемпфированием, определяется по формулам

$$\bar{\delta}_{i0} = \frac{\delta_{i0}^{(1)}}{\delta_{i0}^{(2)}} = \left(\frac{B_{11}}{\rho}\right)_{(2)}^{0,5} \left(\frac{B_{11}}{\rho}\right)_{(1)}^{-0,5} \frac{F_{(1)}(\bar{K})}{F_{(2)}(\bar{K})}; \quad \bar{\delta}_{i1} = \left(\frac{B_{66}}{\rho}\right)_{(2)}^{0,5} \left(\frac{B_{66}}{\rho}\right)_{(1)}^{-0,5} \frac{P_{(1)}(\bar{K}, \varepsilon)}{P_{(2)}(\bar{K}, \varepsilon)}$$

Известно /4/, что уровень аэродемпфирования может быть увеличен за счет изменения угла атаки, уменьшения шага решетки, частоты колебаний и плотности материала лопатки. Для композитных материалов последние два фактора имеют существенное значение. Плотность КМ составляет 1,4...2,5 г/см<sup>3</sup>, что существенно меньше плотности сталей и титана.

Обладая неоднородностью и анизотропией свойств, эти материалы позволяют изменять в широких пределах собственные частоты колебаний. При уменьшении  $\omega_{ij}$  аэродемпфирование возрастает, причем обратно пропорционально при больших частотах и еще существеннее при малых частотах за счет изменения режимов обтекания (за счет увеличения коэффициентов  $F(R)$  и  $F(R, \alpha)$ ).

Сравнение уровня аэродемпфирования стержней из различных однонаправленных КМ (армированных вдоль стержня) и металлов представлено в таблице. Видно, что при изгибных колебаниях декремент стержней из бороалюминия ВКА-1, бормагния ВКМ-1, боропластика КМБ-3 и углепластика КМУ-3 в 1,2...2,4 раза выше, чем стальных, примерно одинаков с декрементом титановых сплавов и в 1,2...2,4 раза ниже, чем у стержней из алюминиевого сплава. Наибольшим демпфированием из рассмотренных стержней обладают стеклопластиковые.

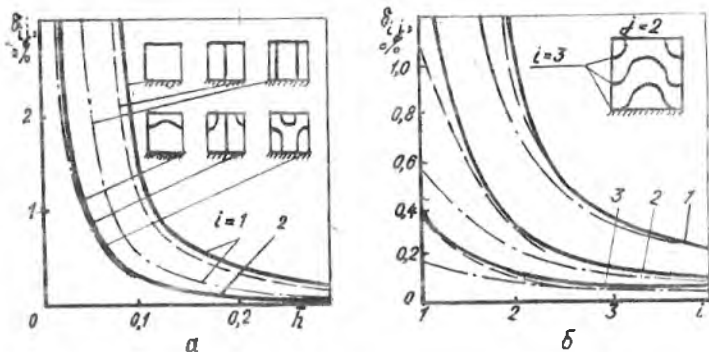
При крутильных колебаниях декремент стержней из КМ существенно превышает уровень декремента стержней из металлов. Наибольшим демпфированием здесь обладают углепластиковые стержни. Обусловлено это малым удельным весом и низкой крутильной жесткостью однонаправленного углепластика. Указанный в таблице диапазон изменения  $\delta_{ij}$  однонаправленных КМ обусловлен возможным отличием режимов обтекания стержней вследствие уменьшения собственных частот. При углах армирования  $\pm \varphi$  (угол между направлением волокон и осью, перпендикулярной заделке) отличие в демпфировании композитных и металлических стержней будет еще более значительным. Так, декремент изгибных колебаний стержня из боропластика превышает декремент стержней из стали, титана и алюминия соответственно в 1,36...9,7; 0,75...5,36; 0,48...3,43; из углепластика - в 1,84...12; 1...6,66; 0,64...4,18; из стеклопластика - в 4,0...8,1; 2,2...4,5; 1,40...2,83. Таким образом, декременты колебаний композитных стержней (пластин) могут существенно превышать соответствующие значения металлических элементов.

На уровень аэродемпфирования большое влияние оказывают относительные размеры пластин. Качественный анализ формул (2) и (4) свидетельствует о том, что в зависимости от способа увеличения  $C$  от 0 до  $\infty$  наблюдается различное протекание  $\delta_{ij}$ . Так, при  $a = const$   $\delta_{i0} = const$ , величины  $\delta_{i1}$  и  $\delta_{i2}$  изменяются от  $\delta_{i0}$  до 0. При  $b = const$  декременты колебаний возрастают с ростом  $C$ , например  $\delta_{i0}$  и  $\delta_{i1}$  - до  $\infty$ , а  $\delta_{i2}$  - до конечной величины, зависящей от  $b/h$ . Следует отметить, что для более анизотропных материалов (при малых  $\bar{B}_{22}$ ,  $\bar{B}_{66}$ ) при  $a = const$  кривые  $\delta_{i1}$  и  $\delta_{i2}$  про-

Относительный декремент изгибных и крутильных колебаний  
однонаправленных композитных стержней, обусловленный  
аэродинамическим сопротивлением

| Материал стержня   | Марка  | Относительный декремент изгибных колебаний<br>$\bar{\delta}_{\xi 0} = \frac{\delta_{\xi 0}^{KM}}{\delta_{\xi 0}^{металл}}$      |  |  |
|--------------------|--------|---|--|--|
|                    |        | $\delta_{\xi 0}^{KM} / \delta_{\xi 0}^{сталь}$  | $\delta_{\xi 0}^{KM} / \delta_{\xi 0}^{титан}$   | $\delta_{\xi 0}^{KM} / \delta_{\xi 0}^{алюмин.}$   |
| Боролитий          | ВКА-1  | 1,17...1,55   | 0,65...0,86                                      | 0,42...0,55  |
| Бороматний         | ВКМ-1  | 1,39...1,84   | 0,77...1,02                                      | 0,49...0,65  |
| Боропластик        | КМБ-3  | 1,36...1,79   | 0,75...1,0                                       | 0,48...0,63  |
| Углеродный пластик | КМУ-3  | 1,84...2,43   | 1,02...1,35                                      | 0,64...0,85  |
| Стеклопластик      | ЭТФ-ВМ | 4,0...4,08  | 2,2...2,3  | 1,4...1,5  |
| Материал стержня   | Марка  | Относительный декремент крутильных колебаний<br>$\bar{\delta}_{\eta 1} = \frac{\delta_{\eta 1}^{KM}}{\delta_{\eta 1}^{металл}}$ |  |  |
|                    |        | $\delta_{\eta 1}^{KM} / \delta_{\eta 1}^{сталь}$  | $\delta_{\eta 1}^{KM} / \delta_{\eta 1}^{титан}$ | $\delta_{\eta 1}^{KM} / \delta_{\eta 1}^{алюмин.}$ |
| Боролитий          | ВКА-1  | 4,7...4,8   | 2,6...2,7  | 1,6...1,7  |
| Бороматний         | ВКМ-1  | 5,3...5,4   | 2,9...3,0  | 1,8...1,9  |
| Боропластик        | КМБ-3  | 5,99...16,77  | 3,32...9,3                                       | 2,1...5,88   |
| Углеродный пластик | КМУ-3  | 11,64...34,92   | 6,46...19,4                                      | 4,08...12,24                                       |
| Стеклопластик      | ЭТФ-ВМ | 6,6...18,48   | 3,61...10,1                                      | 2,31...6,47  |

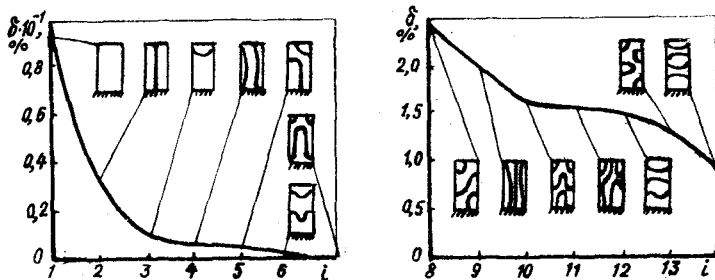
текает более полого, а при  $\delta = const$  наблюдается более крутое протекание кривых  $\delta_{\xi 0}(c)$  и  $\delta_{\eta 1}(c)$ . С увеличением относительной толщины пластины  $\bar{h} = h/a$  в интервале от 0 до 0,01 декремент колебаний уменьшается особенно сильно (рис. 1, а). Для толстых пластин ( $\bar{h} \geq 0,2$ )  $\delta_{\xi 0}$  слабо зависит от номера и типа форм колебаний, а для очень толстых плит ( $\bar{h} \geq 0,5$ ) эта зависимость практически отсутствует. Увеличение



Р и с. 1. Зависимость декремента колебаний углепластиковой пластины КМУ-1л ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $V = 300 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) от относительной толщины  $\bar{h}$  (а) и номера формы  $\bar{i}$  (б,  $\bar{h} = 0,05$  (1); 0,1 (2); 0,2 (3))

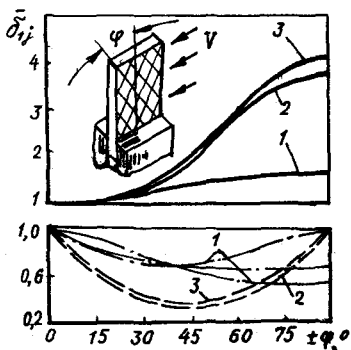
номера формы колебаний также приводит к резкому уменьшению декремента колебаний, особенно в низкочастотной области спектра тонких пластин (рис.1,б). При больших  $\bar{i}$  декремент практически не зависит от типа форм колебаний ( $\bar{j}$ ), т.е.  $\delta_{ij} = \text{const}$  при  $\bar{j} = \text{ver}$ . Для более толстых пластин это наблюдается при меньших  $\bar{i}$ . Следует отметить, что распределение форм колебаний в спектре по интенсивности аэродемпфирования совпадает с распределением по частотам. Так как при изменении упругогеометрических характеристик происходит инверсия форм  $\pi$ , то для различных пластин наблюдается и различное распределение форм по интенсивности аэродемпфирования. При изменении параметра  $B_{22}B_{11}^{-1}C$  от 0 до  $\infty$  порядок следования форм в спектре по убыванию уровня аэродемпфирования перестраивается от структуры спектра (10, 11, 12, ..., 1n, 20, 21, 22, ..., 2n, 30, 31, 32, ..., 3n, ..., m0, m1, m2, ..., mn) до (10, 20, 30, ..., m0, 11, 21, 31, ..., m1, ..., 1n, 2n, 3n, ..., mn). При этом всегда  $\delta_{ij} < \delta_{min}$ , если  $\bar{i} > m$ ,  $\bar{j} > n$ . Распределение форм в спектре по  $\delta_{ij}$  представлено на рис. 2.

Изменение степени анизотропии свойств материала, например варьированием угла армирования пластины  $\pm \varphi$ , может оказывать существенное влияние на декремент колебаний (рис. 3). Так, без учета изменения



Р и с. 2. Зависимость  $\delta_{ij}$  от номера форм  $i$  в спектре частот пластин из КМУ-1л ( $\varphi = \pm 15^\circ$ ;  $\lambda = 2$ ;  $\nu = 0,0165$ ;  $V = 300 \text{ м·с}^{-1}$ )

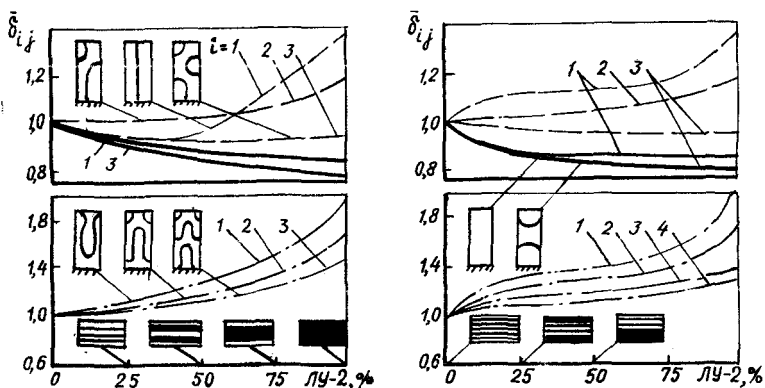
режима обтекания пластин, увеличение  $\varphi$  от 0 до  $\pi/2$  для стержней из КМБ-1, КМУ-1л и ЭТФ-ВМ приводит к возрастанию декремента изгибных колебаний соответственно в 4,16; 3,84 и 1,65 раза. Минимальное аэродемпфирование при  $\varphi = \pm 45^\circ \dots 50^\circ$ . Относительный декремент  $\bar{\delta}_{11} = \delta_{11}^\varphi / \delta_{11}^0$  для боро-, угле-, стеклопластиковых пластин в этом случае равен соответственно 0,41, 0,37 и 0,73. С увеличением номера формы  $i$ , декремент крутильных колебаний возрастает, и при больших  $i$  минимальное значение  $\bar{\delta}_{i1}$  наблюдается, если  $\varphi = 0^\circ$ . Увеличение угла армирования приводит к падению декремента колебаний  $\bar{\delta}_{i2}$ . С ростом  $i$  интенсивность падения уменьшается, а при достаточно больших значениях происходит увеличение декремента. Следует отметить, что классическая теория пластин, не учитывающая эффекты от поперечных сдвигов и обжатия, дает завышенные значения частот и, как следствие, заниженные значения декрементов.



Р и с. 3. Влияние угла армирования  $\varphi$  на относительный декремент колебаний  $\bar{\delta}_{ij}$  пластин ( $\lambda = 2,4$ ;  $\nu = 0,014$ ) из различных КМ:  $\nu = 0$  (—),  $\nu = 0,0165$  (---), ЭТФ-ВМ (1); КМУ-1л (2); КМБ-1 (3)

Изменение характера и степени неоднородности материала приводит

и изменению анизотропии свойств и плотности и, как следствие, влияет на аэродемпфирование. На рис. 4 приведены зависимости относительного декремента колебаний от содержания углеродной ленты ЛУ-2 в однонаправленных стеклоуглепластиковых пластинах при различном характере неоднородности. Видно, что декремент изгибных колебаний с ростом ЛУ-2 уменьшается на 20...30%, причем существеннее для высших форм. Декре-



Р и с. 4. Влияние содержания углеродной ленты ЛУ-2 и характера неоднородности стеклоуглепластика на относительный декремент колебаний пластины ( $C = 2,4$ ;  $\bar{h} = 0,014$ ):  $j = 0$  ( — ),  $1$  ( - - - ),  $2$  ( — · — )

мент колебаний по пластиночным формам возрастает в большей степени при низших формах ( $\bar{\sigma}_{12} = 2$ ). С увеличением номера формы интенсивность роста падает. Аэродемпфирование при крутильных колебаниях с ростом ЛУ-2 незначительно уменьшается при  $i \geq 3$  и возрастает при  $i = 1,2$  ( $\bar{\sigma}_{11}^{max} = 1,35$ ). Однако  $\bar{\sigma}_{11}^{min}$  наблюдается при 30...35%-м содержании ЛУ-2, когда слои углеродной ленты расположены внутри пакета.

Упругогеометрические параметры пластин оказывают влияние и на соотношение декрементов колебаний различных типов. Так, с увеличением  $C$  от 0 до  $\infty$  в соответствии с выражением (3)  $\alpha_i$  и  $B$  уменьшаются соответственно от 1...3 до 0 и от 1 до 0. Значение  $\alpha_i$  ( $C=0$ ) зависит от числа Струхала  $\bar{K}$ , причем  $\alpha_i$  ( $\bar{K} \leq 0,1$ ;  $C=0$ ) = 3;  $\alpha_i$  ( $\bar{K} \geq 0,5$ ;  $C=0$ ) = 1. С увеличением  $C$  влияние  $\bar{K}$  на  $\alpha_i$



падает. Минимальное значение  $\alpha_1 (\bar{h}=1)$  наблюдается при  $\varphi = +55 \dots 60^\circ$  для КМ с различной степенью анизотропии. Наибольшее соотношение между  $\beta_{11}$  и  $\beta_{30}$  наблюдается при  $\varphi = 0^\circ$ , и оно значительно выше, чем для металлических стержней.

Таким образом, проведенные исследования показывают существенную зависимость аэродемпфирования лопаток из КМ от их упругих и геометрических характеристик. Здесь возможно управление декрементом колебаний. Сравнение эффективности аэродемпфирования металлических и композитных лопаток свидетельствует в пользу последних.

#### Библиографический список

1. Самойлович Г.С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. - М.: Наука, 1969. - 444 с.
2. Некрасов А.И. Теория крыла в нестационарном потоке. - М.: Изд-во АН СССР, 1947. - 258 с.
3. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. - М.: Гостехиздат, 1950. - 444 с.
4. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагрузках / Под ред. В.Т.Троценко. - Киев: Наукова думка, 1981. - 315 с.
5. Карташов Г.Г., Кузнецов Н.Д. Собственные колебания пластин и незамкнутых оболочек из композиционных материалов. - В кн.: Тр. XII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. Ереван: ЕГУ, 1980, т. П, с. 211-217.
6. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. - Киев: Наукова думка, 1964. - 288 с.
7. Карташов Г.Г., Кузнецов Н.Д. Свойства спектра свободных колебаний панелей и пластин из композиционных материалов. - В кн.: Тр. XIII Всесоюз. конф. по теории пластин и оболочек. Таллин: ТПИ, 1983, т. 3, с. 25-30.