

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Кафедра «Авиационные двигатели»

**Дисциплина: «Конструкция и проектирование авиационных
двигателей и энергетических установок»**

Отчет к лабораторной работе №3

Тема: Расчетный анализ колебаний рабочих лопаток ГТД

Вариант № 19

Выполнили студенты гр. АД-18-1с
Каткова Е.А.
Конюшевская К.В.

Работа принята _____

2023

1. Методика определения низшей собственной частоты колебаний рабочих лопаток.

Для расчета низшей собственной частоты невращающейся лопатки используется закон Рэлея.

$$K + \Pi = const$$

$$K_{\max} = \Pi_{\max}$$

Π_{\max} – в момент максимального отклонения.

Рассматриваем гармонические колебания с круговой собственной частотой p . В качестве допущений принимаются: стержневая модель, жёсткое консольное закрепление, отсутствие потерь энергии, а также рассматриваются свободные гармонические колебания по первой изгибной форме.

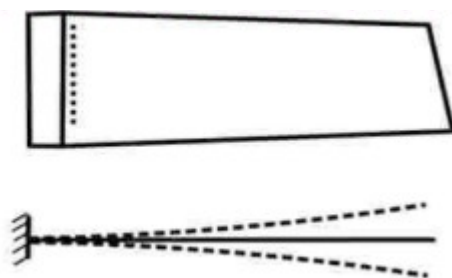


Рисунок 1 – Первая изгибная собственная форма колебаний лопатки
Перемещения произвольной точки оси лопатки с координатой x задают в виде:

$$y(x, t) = y_0(x) \cos pt$$

Максимальная кинетическая энергия:

$$K_{\max} = \frac{1}{2} p^2 \int_0^L \rho F(x) y_0^2(x) dx$$

Максимальная потенциальная энергия:

$$\Pi_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2(x)}{EI(x)} dx$$

где $M(x) = EI(x) \frac{d^2 y_0(x)}{dx^2}$ – изгибающий момент, соответствующий прогибу $y_0(x)$.

Отсюда, круговая собственная частота:

$$p = \sqrt{\frac{\int_0^L EI(x) \left[\frac{d^2 y_0(x)}{dx^2} \right]^2 dx}{\int_0^L \rho F(x) y_0^2(x) dx}}$$

Собственная частота колебаний лопатки при комнатной температуре без учёта вращения:

$$f_c = \frac{p_c}{2\pi}$$

Изменение собственной частоты колебаний лопатки с учетом вращения и изменения температуры:

$$f_{\partial} = \sqrt{\frac{E_t}{E_{20}} f_c^2 + Bn^2}$$

где $B = 0,8 \frac{D_{cp}}{H} - 1$ – коэффициент динамического ужесточения.

2. Подготовка исходных данных для анализа колебаний лопатки. Расчет низшей собственной частоты колебаний лопатки.

Для заданного варианта лопатки была построена таблица с исходными данными, таблица с геометрическими параметрами пяти расчётных сечений лопатки, а также таблица с характеристиками материала лопатки. Помимо этого, было вычислено значение низшей собственной частоты колебаний. Параметры материала были найдены исходя из прил. Е. [1]

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта

| Вариант | № ступени | Узел | Частота вращения ротора минимальная n_{min} , об/мин | Частота вращения ротора максимальная n_{max} , об/мин | Число направляющих лопаток перед рабочим колесом z_1 | Число направляющих лопаток за рабочим колесом z_2 | Температура лопатки $T_{n_{min}}$ при n_{min} , К | Температура лопатки $T_{n_{max}}$ при n_{max} , К |
|---------|-----------|------|--|---|--|---|---|---|
| 19 | 7 | КВД | 7200 | 11600 | 85 | 85 | 380 | 610 |

Таблица 2 – Геометрические параметры пяти расчётных сечений лопатки

| N | R, мм | C_{max} , мм | h, мм | b, мм | β , ° |
|---------|--------|----------------|-------|-------|-------------|
| V-V | 280,5 | 1,74 | 1,38 | 25 | 36° |
| IV-IV | 270,75 | 1,94 | 1,405 | 25 | 32°40' |
| III-III | 261 | 2,125 | 1,605 | 25 | 28°25' |
| II-II | 251,25 | 2,317 | 1,86 | 25 | 24°10' |
| I-I | 241,5 | 2,52 | 2,27 | 25 | 19°40' |

Таблица 3 – Характеристики материала лопатки

| ρ , кг/м ³ | Сигма пред, МПа | E_{20} , $1 \cdot 10^{11}$ Па |
|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| 4500 | 720 | 1,165 |

Вычисленное значение низшей собственной частоты колебаний: $f_c = 1571,9 \text{ Гц}$.

3. Построение резонансной диаграммы. Анализ возможных резонансных режимов лопатки.

Характер изменения температуры лопатки принимается в соответствии с рисунком 2, приведенным ниже. Зависимость была построена с помощью исходных данных. Также в таблице 4 приведены результаты вычисления динамической собственной частоты для 11 значений частоты вращения ротора, а на рисунке 3 – резонансная диаграмма.

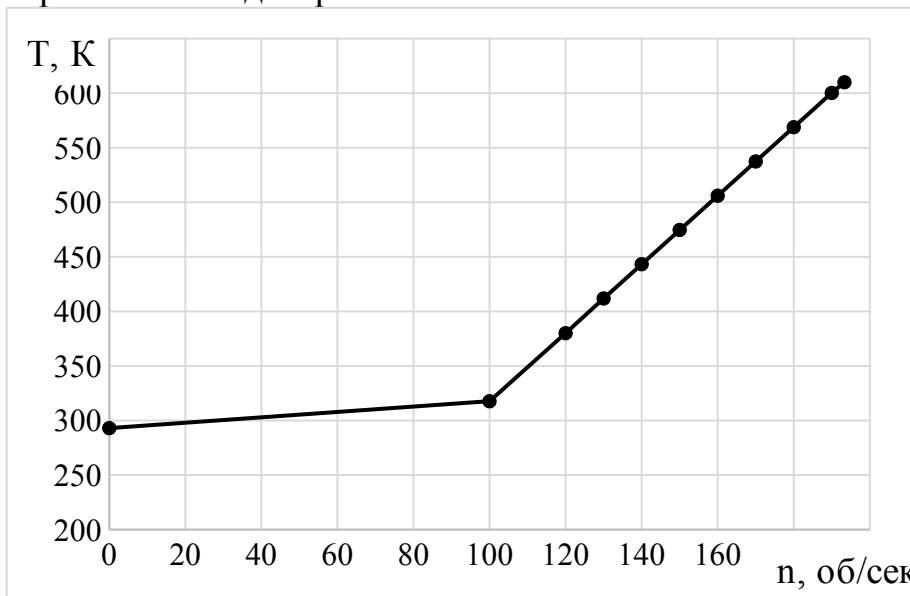


Рисунок 2 – Зависимость температуры лопатки от частоты вращения

Таблица 4 – Результаты вычисления динамической собственной частоты

| Рисунок 3 – диаграмма Резонанс совпадении из составляющих любой из динамических Исходя из можно резонанс может совпадении | n, об/сек | T, К | $E_t, 1 \cdot 10^{11} \text{Па}$ | $f_d, \text{Гц}$ | Резонансная |
|--|-----------|--------|----------------------------------|------------------|-----------------|
| | 0 | 293 | 1,165 | 1571,913 | |
| | 100 | 317,62 | 1,165 | 1602,494 | |
| | 120 | 380 | 1,16 | 1612,481 | наступает при |
| | 130 | 411,82 | 1,156 | 1617,369 | частоты одной |
| | 140 | 443,22 | 1,15 | 1621,532 | гармонических |
| | 150 | 474,62 | 1,146 | 1627,586 | нагрузки kn с |
| | 160 | 506,02 | 1,14 | 1632,913 | собственных |
| | 170 | 537,42 | 1,133 | 1638,167 | частот f_d . |
| | 180 | 568,82 | 1,125 | 1643,351 | рисунка 3 |
| | 190 | 600,22 | 1,12 | 1651,035 | заметить, что |
| | 193,3333 | 610 | 1,12 | 1654,787 | наступить при |

гармоники нагрузки с динамической собственной частотой. Однако интервал рабочей частоты вращения ротора составляет от 120 до 193,33 об/сек, а резонансный режим наступает на частоте менее 20 об/сек. Это означает, что лопатка будет работать в резонансном режиме незначительное количество времени, и мероприятия по отстройке от резонанса не требуются.

4. Анализ влияния конструктивных факторов на низшую собственную частоту колебаний рабочей лопатки.

4.1. Оценка влияния максимальной толщины профиля на собственную частоту колебаний лопатки.

При увеличении максимальной толщины профиля лопатки на 10 %.

Таблица 5 – Измененные геометрические параметры лопатки

| N | R, мм | C _{max} , мм | C _{max} изм., мм |
|---------|--------|-----------------------|---------------------------|
| V-V | 280,5 | 1,74 | 1,827 |
| IV-IV | 270,75 | 1,94 | 2,037 |
| III-III | 261 | 2,125 | 2,23 |
| II-II | 251,25 | 2,317 | 2,43 |
| I-I | 241,5 | 2,52 | 2,646 |

Измененная собственная частота:

$$f_c = 1619,44 \text{ Гц.}$$

Низшая собственная частота немного повысилась. Это произошло из-за того, что собственная частота пропорциональна толщине профиля:

$$p \sim \sqrt{\frac{I_k}{F_k}} = \sqrt{\frac{bC_{max}^3}{bC_{max}}} = C_{max}$$

Динамические собственные частоты также оказались приближенно пропорциональны толщине профиля. Таким образом с помощью изменения толщины профиля лопатки можно было бы произвести отстройку от резонанса.

4.2 Оценка влияния кривизны профиля на собственную частоту колебаний лопатки.

При увеличении кривизны профиля на 5%.

Таблица 6 – Измененные геометрические параметры лопатки

| N | R, мм | h, мм | h _{изм} , мм |
|---------|--------|-------|-----------------------|
| V-V | 280,5 | 1,38 | 1,518 |
| IV-IV | 270,75 | 1,405 | 1,545 |
| III-III | 261 | 1,605 | 1,765 |
| II-II | 251,25 | 1,86 | 2,046 |
| I-I | 241,5 | 2,27 | 2,497 |

Измененная собственная частота:

$$f_c = 1636,57 \text{ Гц}.$$

Низшая собственная частота повысилась в достаточной степени, так как с увеличением кривизны увеличивается жесткость лопатки, следовательно, первая изгибная форма будет достигаться при большей частоте. Собственные динамические частоты также повысились. Таким образом с помощью изменения кривизны лопатки можно произвести отстройку от резонансного режима.

4.3 Оценка влияния материала лопатки на собственную частоту колебаний.

При изменении материала лопатки с ВТЗ-1 на ЭИ961 изменились плотность и модуль упругости материала.

Таблица 7 – Измененные свойства материала

| ρ , кг/м ³ | Сигма пред, МПа | E_{20} , 1*10 ¹¹ Па |
|----------------------------|-----------------|----------------------------------|
| 7800 | 720 | 2,1 |

Измененная собственная частота:

$$f_c = 1603 \text{ Гц}.$$

Низшая собственная частота почти не изменилась. Это произошло из-за

того, что собственная частота $p \sim \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, но при изменении материала и плотность, и модуль упругости увеличились примерно в два раза. Таким образом можно сделать вывод, что отстройку от резонансного режима очень сложно произвести с помощью изменения материала.

5. Выводы по анализу влияния конструктивных факторов собственную частоту колебаний рабочей лопатки.

Подводя итоги можно сказать, что для отстройки от резонансного режима имеет смысл изменять геометрические параметры лопатки, например, её кривизну или толщину. При этом необходимо проводить анализ собственных динамических частот и гармонических составляющих нагрузки, потому что, отходя от одного резонанса, можно получить другой.

Исходя из полученных результатов наиболее существенно на лопатку влияет изменение амплитуды колебаний, что осуществляется с помощью изменения кривизны профиля. Следует также заметить, что изменение материала практически не влияет на частоту колебаний и является нерациональным способом отстройки от резонансного режима. Отсюда следует, что изменение кривизны лопатки является наиболее эффективным мероприятием по отстройке от резонансных режимов.

Список использованных источников

1. Нихамкин М.А., Воронов Л.В. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Вопросы и задачи: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2005. – 142 с.