

3. Босый Н. Д. Электрические фильтры. — Киев.: ГИТЛ УССР, 1960. — 616 с.
4. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. — М.: МГУ, 1960. — 336 с.
5. Быстров Н. Д., Гимадиев А. Г. Расчет акустического РС — фильтра нижних частот для дифференциальных преобразователей пульсаций давления. — Измерительная техника, 1982, № 2 — 41—43 с.

УДК 539.4.013

*В. С. Вигант, В. А. Радченко, И. А. Холмянский*

### *РАСЧЕТ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Лопатки авиадвигателей работают в сложных силовых и температурных условиях и относятся к числу наиболее ответственных деталей. Соединяются лопатки с дисками с помощью замков различных конструкций, из которых наиболее распространены «елочные» замки.

Для оценки надежности авиадвигателей важнейшее значение имеет рассмотрение вопросов напряженного состояния и концентрации напряжений в замковых соединениях лопаток. Обычные методы расчетов на прочность не позволяют получить полную картину напряженного состояния замковых конструкций, в особенности распределения напряжений в области концентраторов [1]. В настоящее время для численного анализа напряженно-деформированного состояния тел сложной формы широко используется метод конечных элементов (МКЭ).

В работе исследуется напряженное состояние замкового соединения турбинных лопаток с диском типа «елочка» одного из турбореактивных двигателей методом конечных элементов. Исследуется величина концентрации напряжений.

Реализующая программа написана на языке ФОРТРАН для ЕС ЭВМ. Программа позволяет решать плоскую задачу теории упругости.

Для построения сетки конечных элементов используется подпрограмма автоматического разбиения плоской области на треугольные элементы, которая позволяет автоматически генерировать информацию о координатах и номерах узлов по небольшому числу начальных данных [2].

Основная идея заключается в том, что исходная область предварительно разбивается на зоны, которые описываются как

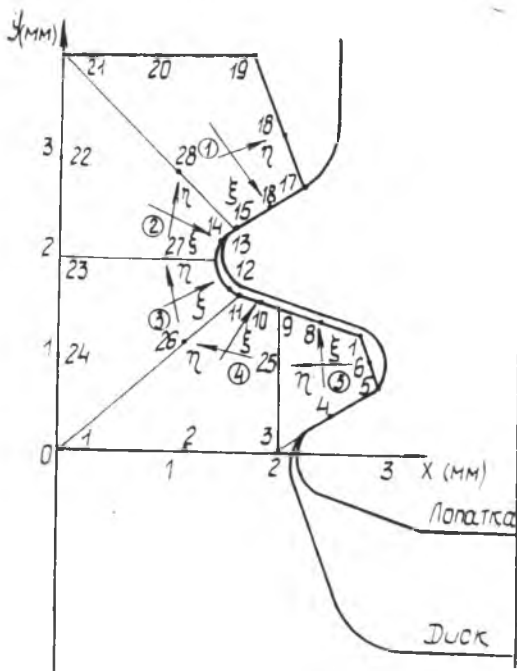


Рис. 1. Предварительное разбиение области на зоны, используемое для генерирования исходных данных элементов

изопараметрические квадратичные четырехугольники. Таким образом, границы зон могут быть описаны любыми кривыми второго порядка. На границе зоны задаются восемь узлов (рис. 1). Глобальные координаты узлов  $X$  и  $Y$  связаны с безразмерными локальными координатами в зонах следующими зависимостями:

$$X(\xi, \eta) = \sum_{i=1,8} X_i N_i(\xi, \eta);$$

$$Y(\xi, \eta) = \sum_{i=1,8} Y_i N_i(\xi, \eta),$$
(1)

где  $N_i(\xi, \eta)$  — функция формы квадратичного четырехугольного элемента.

Задаваясь количеством строк и столбцов в зоне  $n = (2p + 1)$  и  $m = (2q + 1)$  (где  $p = 1, 2, 3, \dots$ ;  $m = 1, 2, 3, \dots$ ), можем по за-

висностям (1) найти координаты всех внутренних узлов, считая что

$$\begin{aligned} \xi_i &= -1 + (i-1) \frac{2}{n-1} ; \\ \eta_j &= -1 + (j+1) \frac{2}{m-1} . \end{aligned} \quad (2)$$

Узлы, находящиеся на пересечении  $i$ -й строки с  $j$  и  $(j+1)$  столбцами, образуют элементарный четырехугольник, который разбивается наименьшей диагональю на два треугольника. Нумерация треугольников ведется по строкам, начиная от узла с координатами  $\xi = -1, \eta = 1$ .

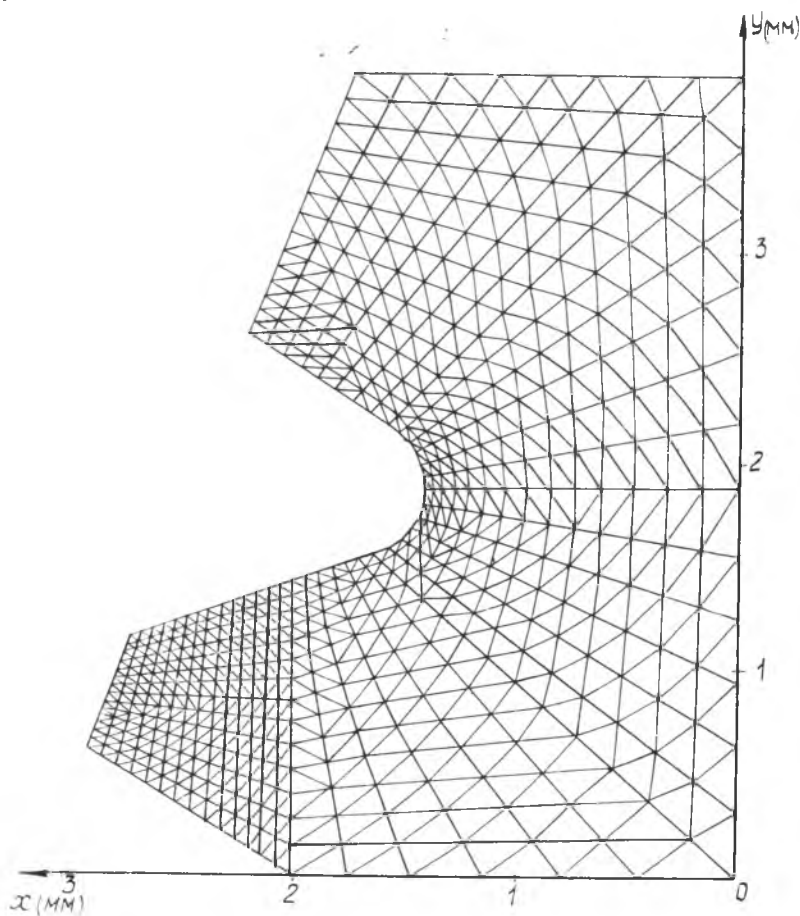


Рис. 2. Разбиение области на треугольные элементы

Направление обхода узлов в треугольнике совпадает с направлением обхода зоны при задании восьми базовых узлов. Нумерация узлов в зоне производится таким образом, чтобы учесть узлы, пронумерованные ранее при рассмотрении предыдущих зон. На рис. 2 показана сетка окончательного разбиения на треугольные элементы одного из вариантов конструктивного исполнения замкового соединения.

При нумерации узлов в каждом треугольнике вычисляется  $M = \max(|i - j|, |j - k|, |k - i|)$ , где  $i, j, k$  — номера узлов треугольника.

Величина  $L_1 = 2(\max M + 1)$  определяет ширину ленты глобальной матрицы жесткости. В ряде случаев специальным выбором зон и направления их обхода можно минимизировать ширину ленты  $L_1$ . Кроме этого, в программе предусмотрен вариант оптимальной перенумерации узлов для получения матрицы жесткости с минимально возможной шириной ленты.

Данный алгоритм генерации информации об элементах является достаточно эффективным, требует небольшого объема вводимой информации и, как показала практика, его использование не требует большого машинного времени.

Программы для решения систем линейных алгебраических уравнений обычно невелики по объему по сравнению с объемом всей конечноэлементной программы.

Но именно от программы решения системы во многом зависят возможности всего комплекса. Следует отметить, что процесс решения уравнений равновесия узлов занимает большую часть времени счета задачи, а это накладывает определенные требования на тщательное составление алгоритма [3].

Применение МКЭ приводит к матрицам высокого порядка. Достоинство МКЭ в том, что эти матрицы положительно определены, симметричны, с ленточной структурой и обычно хорошо обусловлены.

В настоящей работе для расчетов не использовался блочный метод Гаусса с

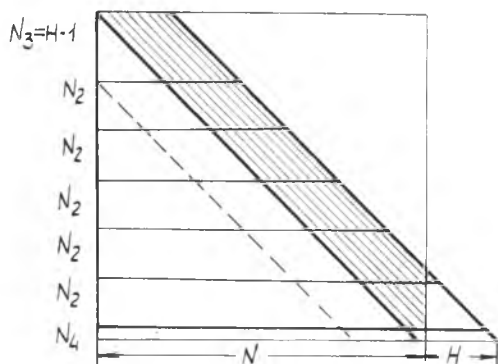


Рис. 3. Блочное представление ленточной симметричной матрицы

использованием в качестве внешнего запоминающего устройства накопителя на магнитных дисках.

На рис. 3 показана матрица системы уравнений порядка  $N$  и симметричная ненулевая ее часть с полушириной ленты  $H$ , разбитая на блоки и дополненная нулевым треугольником. Ленточная часть матрицы записывается в виде одномерного массива построено.

Чтобы сократить количество обращений к внешним запоминающим устройствам, прямой ход решения по методу Гаусса проводится сразу после формирования очередного блока уравнений.

Размер рабочего массива в оперативной памяти должен позволять размещение  $N_1 = N_2 + N_3$  строк уравнений шириной  $H$  (рис. 3). Решение начинается с формирования блока из  $N_1$ -го уравнения. Этот блок сразу обрабатывается прямым ходом, после чего оказывается исключенными  $N_2$  неизвестных. Поэтому первые  $N_2$  строк переписываются во внешнюю память и происходит сдвигка оставшихся коэффициентов на свободное место. «Снизу» приформировывается  $N_2$  следующих уравнений, снова производится прямой ход и т. д. Последним обрабатывается прямым ходом массив из  $N_2 + N_4$  уравнений ( $N_4 \leq N_2$ ). Если не предполагается в дальнейшем производить решение с новой правой частью, то этот последний массив можно не переписывать во внешнюю память, экономя тем самым общее время решения. Обратный ход начинается с последних двух блоков  $N_2$  и  $N_4$ , а затем продолжается для всех остальных блоков в обратном порядке.

Описанный алгоритм позволяет решать системы уравнений любого порядка, но накладывает ограничение на ширину ленты матрицы, так как в магнитном оперативном запоминающем устройстве (МОЗУ) должны размещаться одновременно блоки  $N_3$  и  $N_2$ . При этом необходимо, чтобы блок  $N_2$  состоял не менее чем из одного уравнения. Желательно иметь в этом блоке хотя бы несколько уравнений для сокращения числа обменов с внешними запоминающими устройствами.

По составленной программе выполнены расчеты замковых соединений типа «елочка». Отметим, что характерным случаем разрушения диска является возникновение трещин у основания межпазовых выступов. Поэтому необходимо для оценки прочности знать распределение напряжений во впадине замкового соединения в зоне радиуса перехода.

Были произведены расчеты двузубого замкового соединения типа «елочка». Рассчитывалось тело диска, в котором при работе

возникали трещины у основания первого верхнего выступа. Радиус скругления во впадине составлял 0,35 мм. Для расчета было взято 1120 треугольных элементов, 615 узлов. К наклонной поверхности выступов прикладывалась равномерно распределенная нагрузка. Распределение максимальных главных напряжений показано на рис. 4, а.

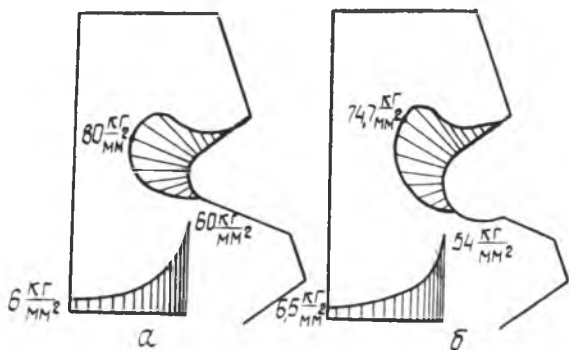


Рис. 4. Распределение максимальных главных напряжений: а —  $R = 0,35$  мм; б —  $R = 0,44$  мм (вариант с выкружкой)

Коэффициент концентрации во впадине в зоне скругления определялся следующим образом:

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}} = \frac{80,5}{14,5} = 5,6,$$

где  $\sigma_{\max} = 80,5 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  — максимальное напряжение в опасном сечении;

$\sigma_{\text{ном}} = \frac{c}{f} = 14,3 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  — номинальное напряжение в этом сечении;

$c$  — центробежная сила, действующая в рассматриваемом сечении;  
 $f$  — площадь сечения.

Был рассчитан вариант с большим радиусом скругления ( $R = 0,44$  мм). При этом на нерабочей поверхности выступа возникла выкружка (вариант с выкружкой). Распределение максимальных главных напряжений показано на рис. 4, б. Коэффициент концентрации напряжений при этом снижается ( $K = \frac{74,7}{14,5} = 5,2$ ), т. е. увеличение радиуса скругления на 22%

позволило снизить максимальные напряжения и коэффициент концентрации на 8%.

Как показывает практика, расположение максимальных расчетных напряжений и место начала образования трещин совпадают.

При изменении режима работы двигателя, например, при наборе оборотов вращения турбины может возникнуть скольжение по поверхности контакта лопатки с диском в замковом соединении из-за разности деформаций контактируемых областей. Это приведет к появлению силы трения скольжения. Расчет с учетом сил трения при коэффициенте трения  $K = 0,15$  показал, что максимальные напряжения при этом изменяются на 11%.

Распределение усилий по поверхности контакта лопатки с диском из-за отклонений от номинальных размеров, разности температурной деформации хвостовика лопатки и выступов диска и ряда других причин может оказаться неравномерным. Было исследовано влияние этой неравномерности. Расчеты показали, что неравномерность нагрузки практически не влияет на максимальные напряжения в зоне скругления во впадине замкового соединения (рис. 5). Но при большой неравномерности нагрузки может оказаться, что поверхность зоны контакта будет пластически деформироваться. Особенно опасен случай контакта по линии (рис. 5, б).

Таким образом, используя метод конечных элементов, рассчитано напряженное состояние в замковых соединениях типа «елочка» с различными радиусами скругления во впадине. Ис-

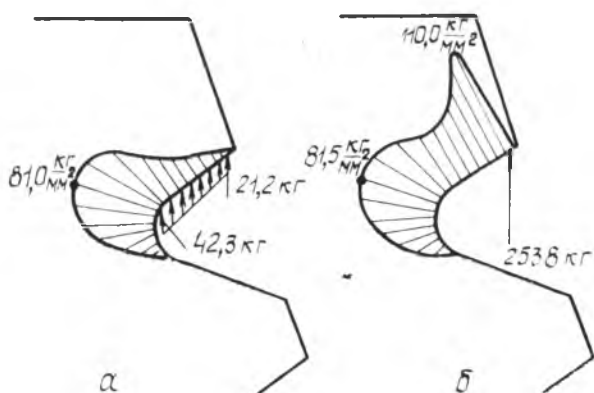


Рис. 5. Действие неравномерной нагрузки: а — трапециевидное распределение нагрузки (суммарная сила равна 253,8 кг); б — сосредоточенная сила, равная 253,8 кг

следовано влияние неравномерности приложенной нагрузки и сил трения, действующих по поверхности контакта лопатки с диском.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мавлютов Р. Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. — М.: Наука, 1981. — 144 с.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979. — 329 с.
3. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Наука, 1980. — 256 с.

УДК 620.178.3

В. М. Дуплякин, А. А. Чураков, Х. С. Хазанов

#### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При создании новых конструкций потребность в оценке их усталостной прочности при заданных эксплуатационных нагрузках возникает уже на ранних стадиях проектирования. В связи с отсутствием самой конструкции проведение традиционных натурных испытаний исключается. Поэтому в настоящей статье предлагается иной подход, в основе которого лежат испытания образцов, изготавливаемых из одинакового с конструкцией материала. Полученные таким образом образцы испытываются далее при двухступенчатом нагружении в соответствии с методикой, изложенной в работе [1]. При этом на первой ступени нагрузки образцы подвергаются случайному нагружению таким образом, чтобы истинные напряжения, определяемые по Нейберу [2], в наиболее напряженных точках образца и конструкции изменялись во времени по одному и тому же закону, а их среднеквадратичные значения  $\bar{S}$  были бы одинаковыми. Поэтому предварительно путем расчета должны быть определены наиболее напряженные места конструкции. Принимается предположение о том, что эквивалентные гармонические режимы нагружения для конструкции будут в этом случае соответствовать эквивалентным напряжениям  $\sigma_{\bar{S}}$ , полученным для образцов.

Определив эквивалентный гармонический режим нагружения, можно оценить и ресурс конструкции. Для этого необходи-