

УДК 624.042.12

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И АЛГОРИТМ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Е.А. Канунникова, И.А. Мещихин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Предложен алгоритм определения наихудших сочетаний действующих на конструкцию внешних сил, при которых в конструкции возникают максимальные внутренние силы и напряжения. При большом количестве расчётных случаев алгоритм позволяет существенно сократить время расчётов. Применительно к конечно-элементным расчётам, алгоритм реализован в виде пользовательской функции в среде MSC Patran-Nastran.

Материал изложен на простых примерах, для каждого из которых приведено сравнение расчёта по предложенному алгоритму и прямого перебора расчётных случаев.

Применение предложенного подхода актуально при анализе напряжённого состояния космических аппаратов на различных этапах жизненного цикла, например, при выведении на орбиту.

Ключевые слова: сочетание нагрузок, метод конечных элементов, PCL.

Введение

Типичной проблемой при проведении прочностных или динамических расчётов конструкций, является выбор «наихудшего» расчётного случая из большого количества различных сочетаний нагрузок, соответствующих различным этапам жизненного цикла изделия. В частности это весьма актуально для космических аппаратов (КА), нагрузки на которые при различных этапах (транспортирование, выведение, функционирование) существенно различаются по характеру воздействий, величине и направлению.

Кроме того, для некоторых случаев нагружения, направление нагрузки может варьироваться в осях изделия (например, направление ветра при старте и т. п.). Обычно выбирают направление, соответствующее оси наименьшей жёсткости изделия, однако в сложной конструкции могут быть элементы, наиболее нагруженные при воздействии в другом направлении.

Для различных элементов изделия максимум напряжений соответствует различным ориентациям вектора перегрузок. Сложность конструкции не всегда позволяет однозначно выделить из всего многообразия ориентаций вектора нагрузок дискретный набор, наперёд соответствующий максимальным развиваемым в конструкции напряжениям.

Иногда, например, по результатам совместного анализа со средствами выведения, данные о нагружении КА представляются в виде временных зависимостей ускорений или силовых факторов. В этом случае комбинация нагрузок различна на каждом временном шаге, и даже при проведении статического расчёта (если можно не учитывать динамичность конструкции) приводит к необходимости анализировать сотни и даже тысячи комбинаций. Практически обычно принимают максимальные значения по всем компонентам сил, однако в действительности максимумы по компонентам реализуются не одновременно, и

такая оценка может быть сильно завышена.

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма, который позволит обеспечить полный учёт всего возможного многообразия геометрических мест точек, которые вектор нагрузок принимает в рамках расчётного случая, в то же время минимизируя объём вычислений.

Предлагаемое решение заключается в создании процедуры вычисления максимума напряжений в каждой точке модели, для чего используются результаты расчёта на единичные нагрузки в каждом направлении.

Полное решение задачи заключается в приложении к конструкции с I степенями свободы вектора нагрузки, заданного в T моментах времени, n количество раз (n – количество расчётных случаев).

Процедура решения сводится к решению системы I линейных алгебраических уравнений nT раз.

При этом множество различных сочетаний компонентов вектора нагрузок, заданных в T моментах времени, образует пространство нагрузок с размерностью P .

Под компонентами вектора нагрузки понимается комплекс действующих сил на каждую степень свободы модели. Размерность пространства нагрузок определяется количеством линейно независимых сочетаний компонентов вектора нагрузки. Так, например, при действии на конструкцию инерционных или распределённых нагрузок узловые силы будут пропорциональны приложенному давлению, действующей перегрузке и пр.

В случае если количество линейно независимых компонент P вектора нагрузки меньше количества шагов по времени T , актуально представить множество данных о нагружении в осях его компонентов.

Очевидно, что каким бы не был максимум напряжений, его можно представить в виде линейной комбинации откликов на действие единичных нагрузок, ориентированных по осям компонент.

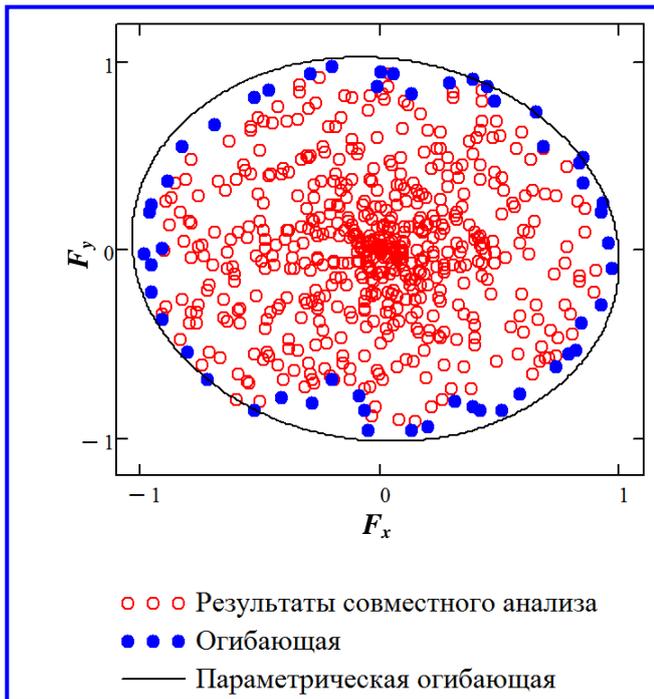


Рис. 1. Пример графического представления данных при двухосном нагружении

Выигрыш по времени решения задачи в предлагаемой формулировке зависит от отношения количества шагов по времени и линейно независимых компонент вектора нагрузки.

На множестве всех возможных сочетаний компонент вектора нагрузок можно выделить группы точек, для которых отношение компонент совпадает. Для каждой выделенной группы наибольшие напряжения при расчёте в линейной постановке будут соответствовать тем, для которых сумма модулей компонент будет наибольшей. В геометрическом смысле данное подмножество будет огибающей к пространству размерности P .

Пусть множество различных сочетаний компонент вектора нагрузки порождается всеми возможными комбинациями L значений по каждой оси. Тогда общее количество точек будет равно L^P . Количество точек, принадлежащих огибающей, будет пропорционально L^{P-1} . Тогда количество элементов огибающей Pk будет

$$\text{пропорционально } \left(\frac{1}{T^P} \right)^{P-1} = T^{\frac{P-1}{P}}.$$

При небольших P выборка из всего множества данных, которые принадлежат огибающей, даёт существенный выигрыш по времени расчёта при полном сохранении точности.

Для дальнейшего уменьшения времени счёта оценки максимумов множество точек огибающей может быть аппроксимировано некоторой кривой. Учесть все возможные комбинации компонент век-

тора нагрузок в рамках заданного расчётного случая без применения итерационных алгоритмов возможно при условии, что огибающая к множеству всех возможных ориентаций вектора нагрузок представима в параметрической форме как можно более простого вида (таким, что возможно определить значения максимума функции аналитически).

В данной работе предлагается в качестве такого параметрического многообразия выбрать эллипсоид, как простую замкнутую поверхность общего вида, наилучшим образом описывающую огибающую к множеству состояний вектора нагрузки.

Эллипсоид огибающей к P -мерному множеству нагрузок однозначно задаётся P -ортогональными векторами, которые определяются по следующему алгоритму:

Шаг 1. Осуществляется поиск вектора с наибольшей магнитудой.

Шаг 2. Для множества векторов, ортогональных найденному на предыдущей итерации, повторяется шаг 1.

Решение задачи нахождения максимума напряжений можно свести к решению I линейных алгебраических уравнений nP раз.

Таким образом, в результате построения модели нагружения в предлагаемой форме, время, потраченное на решение задачи нахождения пиковых значений напряжений (или других параметров отклика конструкции), сократится в $\approx \frac{ITn}{IPn} = \frac{T}{P}$ раз.

Фактически затраченное время будет больше за счёт операций по построению огибающей ($\approx TP$ операций) и её импорту в расчётную программу.

На рис. 1 приведён пример предлагаемого представления данных и основные этапы работы с ними.

Красными точками показано исходное множество данных о нагружении КА (нормированных по максимуму) в осях компонент вектора нагрузки F_x и F_y . Синими точками выделено подмножество огибающей, вокруг которой описан эллипс нагрузок, аппроксимирующий огибающую.

Массив исходных данных содержит 600 точек, введение огибающей позволяет снизить количество сочетаний компонент вектора нагрузок до 52. Представление огибающей в виде эллипса нагрузок (в двумерном пространстве описывается двумя векторами) позволяет определить наихудшее сочетание компонент вектора нагрузок за две операции:

- вычисление отношения компонент вектора нагрузок, при котором достигается максимум напряжений;
- определение соответствующих ему напряжений.

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим два примера, в каждом из которых в каче-

стве объекта исследования выступает консольно закреплённая балка. Задачи решаются в квазистатической постановке.

В первом примере на балку действует комплекс из продольной и поперечной сил. Рассматривается применение предлагаемого подхода для определения наихудшего сочетания компонентов действующей нагрузки и соответствующего ему напряжения. Решение задачи формулируется как в частном виде (применительно к данной задаче), так и в общем виде (независимо от геометрии и вида напряжённого состояния).

Второй пример иллюстрирует предлагаемый подход при определении наихудшего сочетания для балки переменного сечения, нагруженной поперечными силами, которые могут иметь любое направление в плоскости поперечного сечения.

Пример 1. Балка при действии продольной и поперечной нагрузки. На свободный конец консольно закреплённой балки круглого сечения действует комплекс из поперечной F_y и продольной F_x сил.

Для балки круглого сечения все поперечные направления равнозначны, поэтому рассматриваем задачу в плоскости xOy .

Пусть многообразие взаимных сочетаний продольной и поперечной компонент лежит в пределах эллипса, который в параметрическом виде задаётся соотношением:

$$\begin{aligned} F_x &= A \cos(\theta) + B \sin(\theta); \\ F_y &= C \cos(\theta) + D \sin(\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\theta \in (0, 2\pi)$ – параметр.

Параметр θ представляет собой угол наклона вектора нагрузки к осям координат x, y и является уникальным для каждого соотношения компонент вектора нагрузки.

В представленном виде задача сводится к нахождению для каждого элемента конструкции такого соотношения компонент вектора нагрузки θ , при котором напряжения достигают своего максимума.

Для проведения расчётов зададимся следующими значениями параметров в Н:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & 45 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Длина балки L принята равной 1 м, с круглым сечением радиуса $R = 0,1$ м.

Осевой момент инерции:

$$J = \pi \frac{R^4}{4}.$$

Максимальные нормальные напряжения от действия поперечной нагрузки определяются в виде [1]:

$$\sigma_y = \frac{F_y LR}{J} = \frac{F_y}{k_2},$$

где $k_2 = \frac{J}{LR}$.

Максимальные касательные напряжений (в центре сечения):

$$\tau = \frac{4F_y}{3\pi R^2} = \frac{F_y}{k'_2},$$

где $k'_2 = \frac{3\pi R^2}{4}$.

Максимальные нормальные напряжения при действии продольной силы:

$$\sigma_x = \frac{F_x}{\pi R^2} = \frac{F_x}{k_1},$$

где $k_1 = \pi R^2$.

Эквивалентные напряжения для верхних волокон сечения:

$$\sigma_{ecv} = |\sigma_x| + |\sigma_y|. \quad (2)$$

Эквивалентные напряжения для центра сечения:

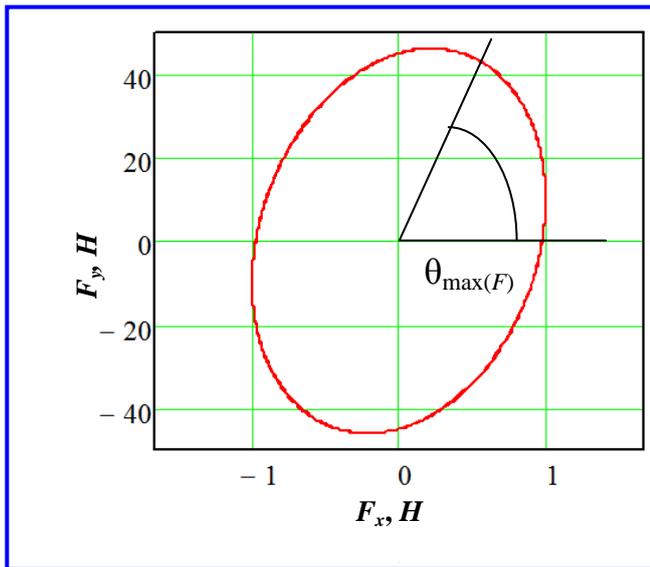
$$\sigma_{ecv} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2}.$$

Для определения наихудшей комбинации подставим уравнения эллипса в выражения для эквивалентных напряжений и продифференцируем полученную функцию по углу:

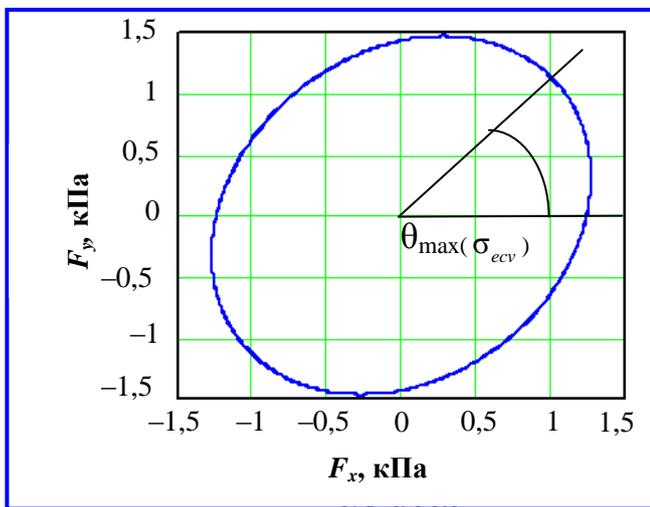
$$\theta = \arctan \left(\frac{\left(\frac{A}{k_1} + \frac{C}{k_2} \right)}{\left(\frac{B}{k_1} + \frac{D}{k_2} \right)} \right) + \pi k.$$

Для центра сечения:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\frac{AB}{k_1^2} + 9\frac{CD}{k_2'^2}}{\frac{A^2}{k_1^2} - \frac{B^2}{k_1^2} + \frac{9C^2}{k_2'^2} - \frac{9D^2}{k_2'^2}} \right) + \frac{\pi}{2} k.$$



а



б

Рис. 2. Эллипс огибающей к действующим нагрузкам (а) и возникающим напряжениям (б)

Таблица 1

Результаты расчёта

Расчётный случай	1	2	3	4	5	6
Угол приложения силы, град	0	18	36	54	72	90
Максимальные напряжения, Па	1592	1956	2130	2094	1854	1432

Параметры нагрузки и расчётной модели таковы, что максимальные напряжения развиваются в крайних волокнах сечения.

На рис. 2 а, б построены эллипсы огибающих для сил (1) и напряжений для корневого сечения (2) в зависимости от угла θ .

Из рис. 2 видно, что максимумы значения магнитуды действующей нагрузки и действующих напряжений достигаются при разных значениях θ .

Для принятых значений параметров максимальные возникающие в конструкции напряжения составляют 2,13 кПа и соответствуют $\theta = 48^\circ$ (см. рис. 2, а), при том, что максимум магнитуды нагрузки соответствует $\theta = 86^\circ$ (см. рис. 2, б).

Проверим полученное решение прямым расчётом в MSC Nastran.

Для проверки полученного решения был создан набор из шести расчётных случаев для различных значений угла $\theta \in [0, 90^\circ]$.

Так как точное значение угла, при котором достигается максимум, лежит в диапазоне $36 - 54^\circ$, то можно ожидать, что максимальными будут напряжения, соответствующие углам в диапазоне $36^\circ - 54^\circ$.

Результаты расчёта представлены в табл. 1.

В общем виде вектор нагрузки имеет три ненулевые компоненты, а напряжённое состояние тела трёхмерно.

Запишем предлагаемый алгоритм в общем виде.

Напряжённое состояние от действия комбинации трёх единичных нагрузок можно охарактеризовать матрицей $S_{ij}^k [6 \times 3]$, где i, j, k принимают значения x, y, z ; i, j – индексы тензора напряжений; k – направление единичной нагрузки.

Комплекс взаимных сочетаний действующих нагрузок определяется эллипсоидом нагрузок:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \cos(\theta) \sin(\psi) \\ \sin(\theta) \sin(\psi) \\ \cos(\psi) \end{pmatrix},$$

где A – матрица коэффициентов эллипсоида нагрузок.

Нас интересуют пиковые значения напряжений по Мизесу, а значит задача сводится к подстановке уравнений эллипсоида с учётом коэффициентов S_{ij}^k в следующее уравнение:

$$\sigma_{ev} = \sqrt{\frac{(S_{xx} - S_{yy})^2 + (S_{zz} - S_{yy})^2 + (S_{xx} - S_{zz})^2 + 3(S_{yy})^2 + 3(S_{yz})^2 + 3(S_{xz})^2}{2}}$$

Для каждой из шести компонент ($S_1 = (S_{xx} - S_{yy}) \dots S_6 = S_{xz}$) после подстановки в них уравнений эллипсоида получим следующее выражение:

$$S_i = a_i \cos(\theta) \sin(\psi) + b_i \sin(\theta) \sin(\psi) + c_i \cos(\psi),$$

где a_i, b_i, c_i определяются как:

$$\begin{aligned} a_i &= A_{1,1}(S_{xx}^x - S_{yy}^x) + A_{2,1}(S_{xx}^y - S_{yy}^y) + A_{3,1}(S_{xx}^z - S_{yy}^z), \\ b_i &= A_{1,2}(S_{xx}^x - S_{yy}^x) + A_{2,2}(S_{xx}^y - S_{yy}^y) + A_{3,2}(S_{xx}^z - S_{yy}^z), \\ c_i &= A_{1,3}(S_{xx}^x - S_{yy}^x) + A_{2,3}(S_{xx}^y - S_{yy}^y) + A_{3,3}(S_{xx}^z - S_{yy}^z). \end{aligned}$$

Максимуму реализаций каждой из компонент соответствуют углы:

$$\theta_i = \arctan \left(\frac{\sqrt{a_i^2 + d_2}}{\sqrt{b_i^2 + d_1}} \right),$$

$$\psi_i = \arctan \left(\frac{\sqrt{(a_i \cos(\theta_i) + b_i \sin(\theta_i))^2 + d_2}}{\sqrt{c_i^2 + d_1}} \right).$$

Коэффициенты d_1 и d_2 в приведённых выше формулах – малые числа, причём $d_1 > d_2$. Они нужны для предотвращения деления на ноль и разрешения неопределённости вида $\frac{0}{0}$.

В результате получим шесть пар углов, при которых в модели развиваются покомпонентные максимумы. Взяв корень от суммы квадратов покомпонентных максимумов, получим оценку для максимальных напряжений, которые возникают в конструкции с учётом всех возможных сочетаний действующих нагрузок.

Методика расчёта, изложенная в предлагаемом виде, не накладывает ограничения на тип используемых в расчёте элементов и позволяет определять наихудшее сочетание нагрузок при достаточно общих предположениях о действующих нагрузках.

Коротко остановимся на реализации алгоритма в виде пользовательской функции в среде MSC Patran/Nastran.

Без модификаций MCS Patran не может работать с нагрузками, заданными в виде параметрических многообразий. Для реализации предлагаемого подхода требуется разработка набора пользова-

тельских функций [2] и элементов графического интерфейса.

С точки зрения конечного пользователя, алгоритм работы с применением предлагаемого подхода состоит из следующих этапов:

1. Импорт нагрузок в Matlab, построение огибающих, вывод в текстовый файл системы ортогональных векторов, задающих эллипсоид.
2. Импорт эллипсоида нагрузок в Patran как поля.
3. Приложение к конструкции единичной нагрузки по каждому из направлений системы координат КА, расчёт напряжённого состояния при их действии.
4. Запуск пользовательской функции по поиску наихудшего для каждого элемента КА сочетания нагрузок и вывод напряжений.

Применительно к рассматриваемой задаче ненулевые коэффициенты матриц A и S равняются:

$$A_{11} = 10;$$

$$A_{12} = 45;$$

$$A_{21} = 1;$$

$$S_{xx}^x = \frac{1}{k_1} = 31,83;$$

$$S_{xx}^y = \frac{1}{k_2} = 1273.$$

Результаты численного расчёта по представленной методике, интегрированной в систему MCS Patran, приведены на рис. 3 (распределение максимальных напряжений вдоль оси балки) и на рис. 4 (отображён соответствующий им угол наихудшей ориентации вектора нагрузки θ , который меняется от 48° до 12° от корневого сечения до свободного конца).

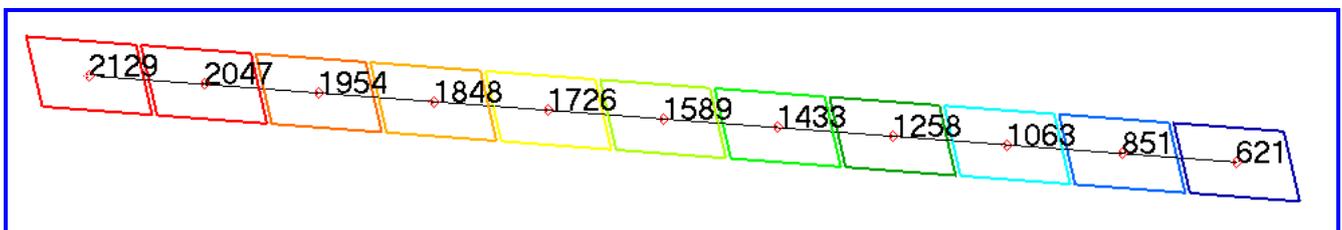


Рис. 3. Распределение максимальных напряжений, Па

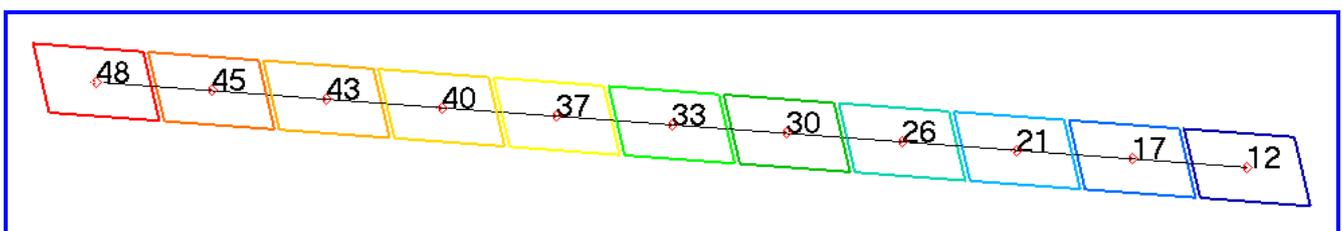


Рис. 4. Угол ориентации нагрузки, соответствующий максимальным напряжениям, град

Для рассмотренной балки вклад поперечной нагрузки в напряжения в корневом сечении максимален и равен нулю для свободного конца. Значение продольной компоненты достигает своего максимума при угле $\theta = 12^\circ$ и при отсутствии вклада от поперечной нагрузки углы, при которых достигается максимум напряжений и продольной нагрузки, совпадают. Результаты расчёта наилучшей ориентации вектора нагрузки θ (см. рис. 4) подтверждают приведённые рассуждения.

Предлагаемый подход позволяет, не рассматривая индивидуальные условия нагружения различных элементов, дать оценку напряжённому состоянию КА в целом с учётом всех возможных комбинаций компонент вектора нагружения.

Пример 2. Балка переменного сечения под действием поперечной силы произвольной ориентации. Для более сложных конструкций не всегда очевидна ориентация нагрузки θ , при которой в элементе (сечении) достигаются максимальные напряжения. Рассмотрим балку, на свободный конец которой действует единичная поперечная сила.

Направление поперечной силы в плоскости YOz (перпендикулярной оси балки) произвольно.

Угол θ в данном примере будем отсчитывать от положительного направления оси Oy .

Балка прямоугольного сечения состоит из трёх участков, характеристики которых представлены в табл. 2.

Ориентацию вектора нагрузок θ , при котором достигаются максимальные напряжения, можно определить из соотношений:

$$\sigma(x, \alpha) = \frac{Fx}{W} = 6Fx \left(\frac{\cos(\alpha + \theta)}{bh^2} + \frac{\sin(\alpha + \theta)}{b^2h} \right);$$

$$\theta \Big|_{\sigma(x, \theta) = \max} : \frac{d\sigma(x, \alpha)}{d\alpha} = -\frac{\sin(\alpha + \theta)}{bh^2} + \frac{\cos(\alpha + \theta)}{b^2h} = 0;$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{h}{b} \right) - \alpha + \pi k, k \in \mathbb{Z}.$$

Таблица 2

Геометрические характеристики балки (пример 2)

Участок	Длина, м	Ориентация сечения $\alpha,^\circ$	Ширина, м	Высота, м
1	0,3	-90	0,1	0,01
2	0,4	-45		
3	0,3	0		

И для центров θ (град.) трёх участков составляют:

$$\theta = \begin{pmatrix} 84 \\ 39 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

А соответствующие им изгибные напряжения, σ (Па):

$$\sigma = \begin{pmatrix} 5,13 \cdot 10^5 \\ 3,01 \cdot 10^5 \\ 9,04 \cdot 10^4 \end{pmatrix}.$$

На рис. 5, 6 представлены результаты расчёта наилучшей комбинации действующих нагрузок с применением предлагаемого подхода, интегрированного в систему MSC Patran.

Так как в рассматриваемой задаче участки балки имеют одинаковое сечение, только повернутое на различные углы, естественно ожидать в них одинаковую картину распределения напряжений пропорционально увеличению действующего момента от свободного конца к корневому сечению, а также одинаковый «наихудший» угол действия поперечной силы относительно осей сечения на каждом участке.

Из результатов, представленных на рис. 5 и 6, видно, что максимальные напряжения зависят только от продольной координаты. Значения соответствующих им углов постоянны для каждого участка и отличаются от α на 5° .

Следует отметить, что в представленном подходе содержится упрощение, связанное с формой поперечного сечения балки и требующее дополнительного пояснения. Дело в том, что для балочных элементов возможно достижение максимальных напряжений в разных точках сечения элемента. Для корректного определения, в какой именно точке произвольного сечения максимум будет достигнут, требуется последовательный перебор каждой из них. Данная необходимость отсутствует при наличии симметрии (с точностью до знака) между действующими нагрузками и ориентацией сечения.

В частном случае круглого сечения либо произвольно действующей нагрузки (относительно поперечной плоскости) расчёт может быть выполнен для любой граничной точки сечения.

В целом предложенный алгоритм позволяет оперативно находить наилучшее сочетание действующих нагрузок для произвольной конструкции при достаточно общих предположениях о характере

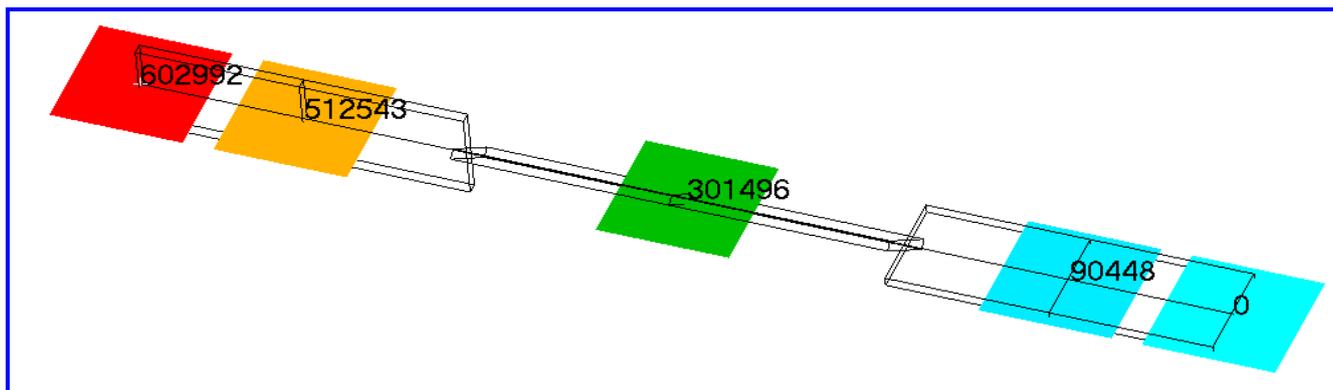


Рис. 5. Распределение максимальных напряжений, Па

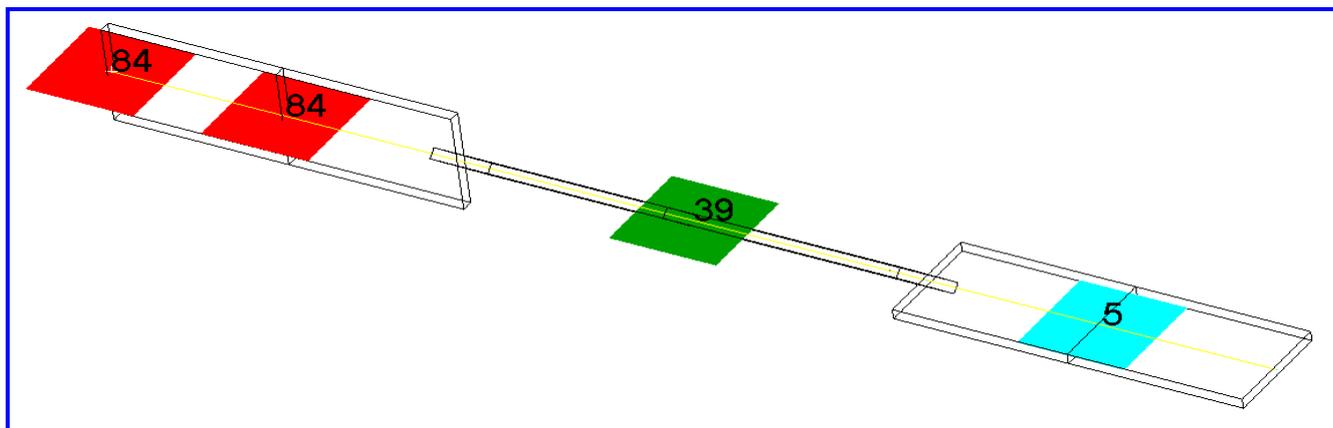


Рис. 6. Угол ориентации нагрузки, соответствующий максимальным напряжениям, град

действующих нагрузок. Тем не менее, область применимости данного подхода ограничена рядом предположений о свойствах конструкции и структуре действующих нагрузок.

Так как алгоритм основан на представлении отклика конструкции в виде суммы откликов на единичные нагрузки, принципиальным является предположение о достаточно хорошей аппроксимации поведения конструкции линейной моделью.

Корректность результатов, полученных в результате применения предлагаемого алгоритма, ограничена корректностью постановки задачи. Так, например, решение может быть некорректным и для тех узлов, в которых происходит скачкообразное изменение характеристик. Таким точкам на рис. 6 соответствуют места стыка сечений с различной ориентацией.

Другим примером является вычисление θ в узлах, в которых все отклики на единичные нагрузки равны нулю. Полученный результат будет определяться значениями коэффициентов d_1, d_2 . Такой точке соответствует свободный конец балки на рис. 6.

Остальные ограничения связаны с конкретными формулировками типов элементов, и принципиально могут быть устранены.

В завершение сказанного, отметим, что спектр приложений предлагаемого подхода может быть расширен и на задачи динамики. В случае представления динамического отклика в виде суперпозиции собственных форм предложенный алгоритм может быть применён для поиска наилучшего сочетания модальных нагрузок. Развитие предлагаемого подхода применительно к динамическим задачам формирует вектор дальнейших исследований.

Выводы

1. Предложена аппроксимация набора данных о действующих на конструкцию нагрузках параметрической огибающей и разработан алгоритм поиска наилучших сочетаний действующих нагрузок.
2. Реализована вычислительная процедура, позволяющая использовать данные, выраженные в виде параметрических огибающих, в расчётах конструкций на прочность с использованием MCS Patran/Nastran.
3. Применение предложенного алгоритма продемонстрировано на простых примерах и обобщено на случай произвольных нагрузок. Полученные

результаты совпали с прямыми расчётами при переборе всех расчётных случаев.

4. Использование предложенного подхода позволяет на принципиальном уровне исключить расчётную ошибку, связанную с некорректным определением наилучшего из возможных вектора нагрузок при минимальных временных затратах.

5. Предложенный алгоритм может быть использован в расчётной практике при оценке несущей

способности КА при выведении.

Литература

1. Расчёты на прочность в машиностроении. Том 1 / С. Д. Пономарёв, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев [и др.]. – М. : Машгиз, 1956. – 884 с.
2. Шатров С. Б., Миронов А. В. Использование языка PCL в среде MSC/Patran для создания специальных приложений / С. Б. Шатров, А. В. Миронов. – М. : MSC, 1999. – 64 с.

Поступила в редакцию 06.12.2013

Елена Александровна Канунникова, канд. техн. наук, начальник лаборатории.

Илья Александрович Мешихин, млад. научн. сотрудник, т. 8 (964) 550-54-57.

E-mail: mefict@mail.ru.