

## Оптимизация панели фермы

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

Проведены численные исследования зависимостей размера поперечного сечения (квадрата и круглой трубы), гибкости и массы сжатых стержней в функции их длины. Установлено наличие минимума зависимости для размера сечения сжатого стержня, что может быть использовано в качестве критерия оптимальности размера панели фермы, и отсутствие минимума зависимости для его массы и гибкости.

Исследовано влияние на минимум этой зависимости следующих параметров - материала стержня, предела прочности материала, коэффициента заделки стержня, величины внешней нагрузки, толщины стенки трубы. Установлен характер влияния указанных выше параметров на величину и расположение минимума зависимости.

**Ключевые слова:** панель фермы, выбор величины панели, минимум зависимости размера поперечного сечения в функции длины, критерий оптимальности размера.

### Введение

В конструкции летательных аппаратов (ЛА), в том числе и судов на воздушной подушке, в качестве силового элемента часто используют пространственные многостержневые системы ферменного или рамного типа, расчет которых достаточно сложен. Автоматизации расчета таких систем и их оптимизации посвящено немало работ, например: предлагают применять компьютерную алгебру для получения точных аналитических решений [1]; описывают метод на основе гибридной нейросетевой программы (осуществляет процесс поиска оптимума с применением нейронных сетей, используя предварительно численное моделирование методом конечных элементов для получения НДС конструкции) [2]; используют программный комплекс ANSYS, где решение задач оптимизации представляет собой компьютерную технологию, заключающуюся в выборе оптимального проекта из нескольких с помощью конечно-элементного анализа [3]; описывается эволюционная оптимизация, при которой параметрическая оптимизация выполняется на основе генетического алгоритма при ограничениях по прочности, жесткости и устойчивости несущей системы [4]; предложена альтернатива методам математического программирования применительно к оптимизации конструкций в виде методологии критериев оптимальности [5].

Все эти методы применимы при уже выбранной конфигурации фермы, а пакеты, используемые ими, подчас тяжеловесны. На начальном этапе разработки конструкции, когда форма ее только рождается, необходима простая программа, позволяющая быстро осуществлять обоснованные прикидки ее элементов.

### Постановка задачи

Разработка конструкции фермы предполагает разбиение длинной фермы на панели и выбор величины панели, желательной оптимальной.

Размер поперечного сечения сжатого стержня всегда больше размера сечения растянутого. Это обусловлено тем, что предельное напряжение сжатия  $\sigma_{кр}$ ,

при котором стержень еще может держать нагрузку, всегда меньше опасного напряжения при растяжении: предела прочности  $\sigma_b$  для хрупких или предела текучести  $\sigma_s$  для вязких материалов. Отсюда следует, что выбор величины панели в большей степени зависит от размера поперечного сечения сжатого стержня, чем растянутого.

Критическое напряжение стержня зависит от материала стержня, величины потребной площади поперечного сечения и его момента инерции (которые являются взаимосвязанными величинами), коэффициента заделки стержня и его длины. Все эти величины пока неизвестны. Поэтому подбор сечения можно осуществить только путем последовательных приближений.

Одним из критериев оптимальности конструкции служит минимум ее массы. В нашем случае, из-за монотонного увеличения массы стержня при увеличении его длины, этот критерий может не работать. Было решено посредством численного исследования установить возможность оптимизации величины панели и найти параметр, который служил бы критерием оптимальности.

### Исследование соснового бруса

Первым, как самым простым видом стержня, исследовался сосновый брус квадратного поперечного сечения. Для исследования использовали (с необходимыми доработками) программу, приведенную в работе [6]. Исходными данными служили:  $C$  — коэффициент заделки стержня,  $\varphi = f(\lambda)$  — коэффициенты понижения допускаемого напряжения в функции его гибкости,  $L_j$  — ряд длин стержня (от 0,25 до 4 м с шагом 0,25 м),  $F$  — усилие, приложенное в другом сечении и создающее изгибающий момент в данном сечении фермы,  $L_{20}$  — плечо этого усилия,  $\sigma_{сж}$  — предел прочности материала при сжатии [7]. Определяемыми величинами для каждой длины стержня были:  $h$  — размер стороны квадрата,  $G$  — масса стержня и  $\lambda$  — гибкость стержня. Исследуем характер изменения этих величин при подборе сечения для ряда длин стержня.

Как и предполагалось, масса стержня  $G$  и гибкость  $\lambda$  монотонно возрастают при увеличении длины  $L$ , поэтому критерием оптимальности размера панели они служить не могут. На рис. 1 видно, что минимум функции имеется у величины  $h$  — размера поперечного сечения, удовлетворяющего критериям устойчивости и прочности. Нелинейный характер кривых свидетельствует о том, что критерием оптимальности может служить именно эта величина, так как очевидно, что при нелинейной зависимости  $G$  от  $L$ , любое линейное изменение

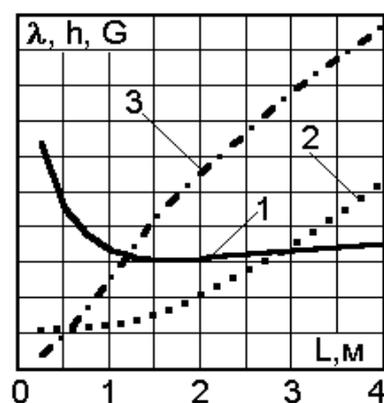


Рис. 1. Характер поведения зависимостей для соснового бруса:

$$1 - h = f(L),$$

$$2 - G = f(L),$$

$$3 - \lambda = f(L)$$

$L$  не приводит к пропорциональному изменению  $G$  и нельзя получить выигрыш в весе для другого размера сечения при данной длине или другой длине при данном размере сечения.

Затем исследовали влияние параметров  $c$  и  $F$  на величину и расположение минимума зависимости  $h = f(L)$ . Как видно на рис. 2, минимум этой величины при увеличении  $c$  смещается в сторону меньших длин и растет по величине, а при увеличении  $F$  смещается в сторону больших длин и тоже растет.

### Исследование труб круглого сечения

Трубы помимо наружного диаметра  $d$  имеют и внутренний (связывает их величины толщина стенки  $\delta$ ). Необходимо убедиться в идентичности характера зависимостей и для такого типа поперечных сечений. С этой целью при одинаковой толщине стенки дюралевых труб подбирали их наружный диаметр.

Характер поведения зависимостей (рис. 3)  $d(L), G(L), \lambda(L)$  у труб оказался подобным характеру поведения аналогичных зависимостей для сплошного сечения.

При исследовании влияния толщины трубы на минимум зависимости  $d = f(L)$  параметр  $\delta$  изменялся от 1 до 5 мм. Оказалось, что с увеличением толщины минимум сдвигается вниз и в сторону меньших длин (рис. 4). Наличие двух минимумов при одной длине требует для выбора использовать дополнительный критерий — массу стержня.

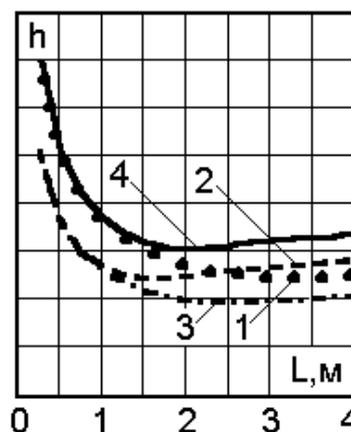


Рис. 2. Поведение  $h = f(L)$  при разных сочетаниях  $c, F = \text{const}$ :  
 1 –  $c = 0,5, F = 35\text{кН}$ ;  
 2 –  $c = 1,0; F = 35\text{кН}$ ;  
 3 –  $c = 0,5; F = 70\text{кН}$   
 4 –  $c = 1,0; F = 70\text{кН}$

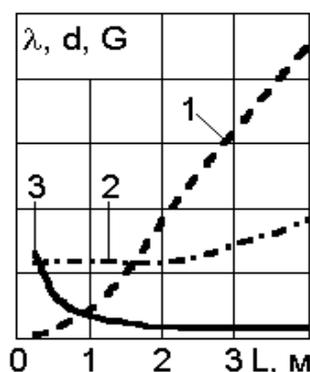


Рис. 3. Характер поведения зависимостей для труб: 1 –  $\lambda = f(L)$ ,  
 2 –  $G = f(L)$ , 3 –  $d = f(L)$

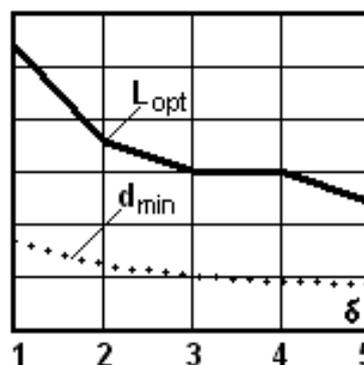


Рис. 4. Характер зависимостей  $d_{min}$  и  $L_{opt}$  от толщины стенки трубы

Для выяснения характера влияния величин  $C$  и  $F$  на величину и расположение минимума зависимости  $d = f(L)$  был осуществлен подбор величин  $d$  при  $c = \text{var}$  ( $F$  и прочие параметры не изменялись) и при  $F = \text{var}$  ( $C$  и другие параметры постоянны). Рост усилия  $F$  (рис. 5, а) увеличивает минимум и смещает его в сторону больших длин. На рис. 5, б видно, что увеличение  $C$  ведет к росту минимума зависимости  $d = f(L)$  и смещению в сторону меньших длин.

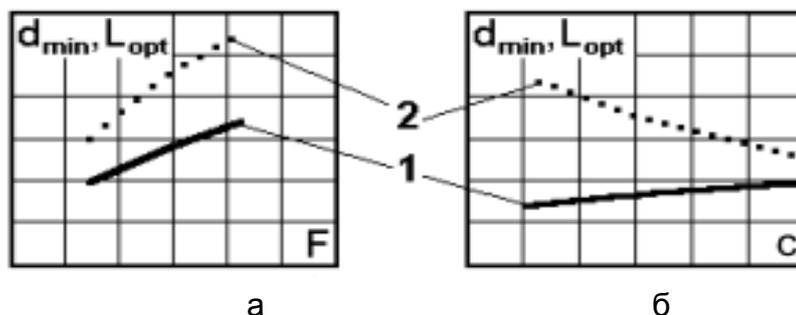


Рис. 5. Характер зависимостей  $d_{\min}$  (1) и  $L_{\text{opt}}$  (2) от  $F$  (а) и  $C$  (б)

Материал труб влияет на выбор наружного диаметра через коэффициент понижения допускаемого напряжения  $\phi$  и через предел прочности материала  $\sigma_{\text{сж}}$ .

Для выяснения влияния характера изменения коэффициента понижения допускаемого напряжения использовали два вида зависимостей:  $\phi_{\text{дюр}} = f(\lambda)$  для высокопрочного алюминиевого сплава и  $\phi_{\text{ст}} = f(\lambda)$  для стали 30ХГСА при одинаковых  $F, \delta, c, \sigma_{\text{сж}}$ . Влияние предела прочности материала  $\sigma_{\text{сж}}$  на выбор наружного диаметра изучали на стали 30ХГСА с постоянными  $F, \delta, c, \phi_{\text{ст}} = f(\lambda)$ , но разными  $\sigma_{\text{сж}}$ .

На рис. 6, а видно, что при переходе от дюралья к стали минимум сдвигается вниз и в сторону меньших длин. Рис. 6, б показывает, что увеличение предела прочности смещает минимум вниз и в сторону меньших длин.

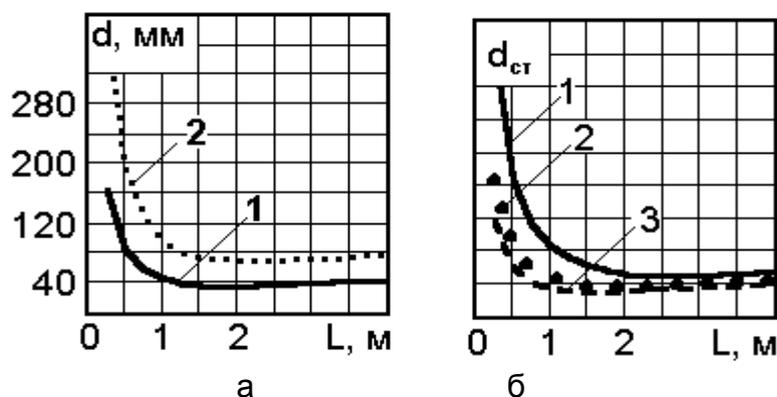


Рис. 6. Влияние материала: а –  $\phi = f(\lambda)$ : 1 – сталь, 2 – дюраль; б –  $\sigma_{\text{сж}}$ , сталь: 1 –  $\sigma_{\text{сж}} = 550 \text{ МПа}$ , 2 –  $\sigma_{\text{сж}} = 1100 \text{ МПа}$ , 3 –  $\sigma_{\text{сж}} = 1600 \text{ МПа}$

## Заключение

Исследование показало, что возможность оптимизации величины панели фермы существует. Критерием оптимума служит минимум зависимости размера поперечного сечения сжатого стержня от его длины. Оптимизация стержня сплошного сечения по данному критерию достаточна. Для труб возможно появление двух минимумов при одной длине (для разных толщин стенки трубы), что требует уточнения оптимальности по минимуму массы.

В дальнейшем предполагается разработка программы для подбора труб из сортамента, как круглых, так и прямоугольных. Трудность автоматизации подбора состоит в дискретном характере изменения размеров, как толщин стенки, так и наружного размера труб.

## Список литературы

1. Кирсанов, М. Н. Аналитический расчет и оптимизация пространственной балочной фермы [Текст] / М. Н. Кирсанов // Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия. Режим доступа к ресурсу <http://vuz.exponenta.ru/PDF/NAUKA/3Dbalka.htm>.
2. Светашков, П. А. Оптимизация пространственных конструкций на основе гибридной нейросетевой программы [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 : защищена 2005 / Светашков Павел Александрович. – Красноярск, 2005. Режим доступа к ресурсу <http://www.dissercat.com/content/optimizatsiya-prostranstvennykh-konstruktsii-na-osnove-gibridnoi-neirosetevoi-programmy>  
Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat.
3. Марчук, Н. И. ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК ANSYS [Текст] / Н. И. Марчук, Е. В. Прасоленко // Сибирский федеральный университет. Режим доступа к ресурсу <http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/st.t%202.2010.pdf>
4. Алексейцев, А. В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней [Текст] / А. В. Алексейцев // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №5(40). – С. 28–37). Режим доступа к ресурсу [http://engstroy.spb.ru/index\\_2013\\_05/alekseicev.html](http://engstroy.spb.ru/index_2013_05/alekseicev.html)
5. Ижендеева, С. Р. Метод синтеза стержневых систем наименьшего веса на основе реализации их особых свойств [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.17 : защищена 2003 / Ижендеева София Ринатовна. – Томск, 2003. – 117 с. Режим доступа к ресурсу <http://www.lib.ua-ru.net/diss/cont/56361.html>
6. Макаров, Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс [Текст] / Е. Г. Макаров. – СПб. : Питер, 2005. – 448 с.
7. Справочная книга по расчету самолета на прочность [Текст] / М. Ф. Астахов, А. В. Караваев, С. Я. Макаров, Я. Я. Суздальцев. – М. : Гос. изд-во оборонной промышленности, 1954. – 702 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Тараненко М. Е.. Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, г. Харьков. Украина

Поступила в редакцию 08.10.2013 г.

## Оптимізація панелі ферми

Проведено числові дослідження залежностей розміру поперечного перерізу (квадрата і круглої труби) і гнучкості й маси стиснутих стрижнів у функції їх довжини. Встановлено наявність мінімуму цієї залежності для розміру перерізу стиснутого стрижня і відсутність мінімуму залежностей для його маси та гнучкості, що може бути використано як критерій оптимального розміру панелі ферми.

Досліджено вплив на мінімум цієї залежності таких параметрів: матеріалу стрижня, межі міцності матеріалу, коефіцієнта закладення стрижня, величини зовнішнього навантаження, товщини стінки труби, на мінімум цієї залежності. Встановлено характер впливу вказаних вище параметрів на величину і розташування мінімуму залежності.

**Ключові слова:** вибір величини панелі, мінімум розміру поперечного перерізу у функції довжини, критерій оптимального розміру, панель ферми.

## Optimization panel farm

Carried out numerical study of the cross-section size (square and round pipes) and a weight of compressed rods in the function of their length. Revealed the existence of the minimum of this matter, for the size of the cross section and the lack of mass of a compressed rod, which can be used as a criterion of optimal size pane of the farm.

The influence of the following parameters: material of the rod, the tensile strength of the material, the coefficient of fixing the rod, the magnitude of the external load, pipe wall thickness, at least this dependence. The effect of the above parameters on the size and location of the minimum dependence..

**Keywords:** sets the magnitude of the panel, at least the size of the cross section in the function of their length, the criterion of optimal size, the panel farm.