дающие степень очистки 70–90 %. Ограничивают применение каталитических нейтрализаторов высокая стоимость, невозможность работы с этилированным бензином (соединения свинца и серы выводят катализаторы из строя) и жесткие технические требования к их конструкции [2].

Также одним из решений проблем теплового загрязнения атмосферы и загрязнения атмосферы вредными веществами является переход двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на альтернативные топлива. Альтернативным, но пока не перспективным топливом для дизельных ДВС является диметиловый эфир. Он производится из природного газа, из которого сначала получают метанол, а затем диметиловый эфир. Диметиловый эфир имеет свойства, аналогичные свойствам дизельного топлива. Перспективным альтернативным топливом для ДВС является биотопливо. Недостатком его является некоторое загрязнение атмосферы при его производстве. Необходимо отметить, что наиболее значительными продуктами биотоплива являются биоэтанол – жидкое спиртовое топливо (безводный спирт) и биодизель – эфиры растительных масел или животных жиров, получаемых в результате химической реакции масла или жира с метанолом [3].

Список литературы

1 Стратегия по снижению вредного воздействия транспорта на атмосферный воздух Республики Беларусь на период до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://naturegomel.by/sites/default/files/inline/files/strategiya_po_snizheniyu_vrednogo_vozdeystviya_transporta.pdf. – Дата доступа : 12.05.2020.

2 **Борисова, Г. М.** Нормативы по защите окружающей среды: курс лекций / Г. М. Борисова. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 95 с.

3 Меры по снижению загрязнения атмосферы вредными веществами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://mcx-consult.ru/mery-po-snizheniyu-zagryazneniya-at – Дата доступа : 12.05.2020.

УДК: 539.31

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕОГРАНИЧЕННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА

А. О. СЕРДЮК [1], Д. О. СЕРДЮК [1], Г. В. ФЕДОТЕНКОВ [1,2]
[1]Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация
[2]НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Пластины представляют широкий класс конструктивных элементов в авиации и космонавтике. Исследование их напряженно-деформированного состояния при статических и ударных нагрузках является неотъемлемым этапом проектирования новых конструктивных элементов перспективных летательных аппаратов. Наиболее трудоемким является исследование поведения конструкций при нестационарных динамических воздействиях, поскольку в этом случае присутствует существенная неоднородность напряженно-деформированного состояния по координатам и времени.

В трудах [1, 2] исследуются вопросы нестационарной динамики изотропных пластин и оболочек. Задачи нестационарной динамики анизотропных пластин и цилиндрических оболочек освещены в работах [3–5].

Объектом исследования является тонкая пластина постоянной толщины h. Движение пластины рассматривается относительно декартовой системы координат $Ox_1x_2x_3$. Плоскость Ox_1x_2 совпадает со срединной плоскостью пластины. В начальный момент времени к невозмущенной пластине прикладывается нестационарное нормальное давление $p(x_1, x_2, t)$.

Материал пластины принят упругим и анизотропным с симметрией относительной срединной плоскости пластины. Для пластины Кирхгофа он характеризуется шестью независимыми упругими постоянными C^{1111}, C^{1122}, C^{1112}, C^{2222}, C^{2212}, C^{1212}.

Уравнение движения анизотропной пластины в перемещениях имеет вид:

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -ID(w) + p(x_1, x_2, t),$$
$$D(w) = c_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + c_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} + 2(c_{12} + 2c_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + 4c_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^3 \partial x_2} + 4c_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial x_1 \partial x_2^3}, \quad (1)$$

где $c_{11} = C^{1111},\ c_{12} = C^{1122}, c_{16} = C^{1112},\ c_{22} = C^{2222},\ c_{26} = C^{2212},\ c_{66} = C^{1212}, I = h^3/12$.

Уравнение (1) совместно с начальными условиями

$$\left. w \right|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial w}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \tag{2}$$

образуют начальную задачу. В соотношениях (1), (2) t – время, w – нормальный прогиб, ρ– плотность материала.

Цель исследования заключается в построении нестационарных функций нормальных и касательных напряжений $\sigma_{x1}(x_1, x_2, t)$, $\sigma_{x2}(x_1, x_2, t)$, $\tau_{x1x2}(x_1, x_2, t)$ в ответ на воздействие нестационарного движущегося давления $p(x_1, x_2, t)$, распределенного по прямоугольной площадке.

Подход к решению основан на методе функции Грина и принципе суперпозиции, согласно которому искомое решение связано с давлением посредством интегрального оператора типа свёртки по пространственным переменным и по времени. Ядром этого оператора является функция Грина для пластины, которая представляет собой нормальные перемещения в ответ на воздействие единичной нагрузки, математически описанной дельта-функцией Дирака. Для построения функции Грина применяются прямые и обратные интегральные преобразования Лапласа по времени и двумерное преобразование Фурье по координатам. Оригинал интегрального преобразования Лапласа найден аналитически, а для обратного интегрального преобразования Фурье использован численный метод интегрирования быстро осциллирующих функций. Полученное фундаментальное решение позволило представить искомый нестационарный прогиб в виде тройной свертки функции Грина с функцией движущегося нестационарного давления, распределенного по прямоугольной площадке. Для вычисления интегралов свёрток использован метод прямоугольников.

При внезапном воздействии на пластину нестационарного движущегося вдоль осей x_1, x_2 по законам $f(t)$ и $g(t)$ соответственно давления, распределенного по прямоугольной площадке, зависящей от времени по закону $P(t)$, выражение для нестационарного нормального прогиба примет вид:

$$\begin{gathered} w(x_1, x_2, t) \approx \sum_{i=0}^{p} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=1}^{n} \frac{a}{p} \frac{b}{m} \frac{t}{n} G_{ijk}(x_1, x_2, t) P\left(\frac{t}{n} k \right), \\ G_{ijk}(x_1, x_2, t) = G\left(x_1 - \frac{a}{p} i + \frac{a}{2} + f\left(\frac{t}{n} k \right),\ x_2 - \frac{b}{m} j + \frac{b}{2} + g\left(\frac{t}{n} k \right), t - \frac{t}{n} k \right), \end{gathered} \tag{3}$$

где a, b – размеры прямоугольной площадки давления, G – функция влияния.

Нормальные σ_{x_1}, σ_{x_2} и касательные $\tau_{x_1 x_2}$ напряжения в пластине с учетом (3) определяются как:

$$\begin{aligned} \sigma_{x_1}(x_1, x_2, t) &= -x_3 \left(c_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2c_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right), \\ \sigma_{x_2}(x_1, x_2, t) &= -x_3 \left(c_{21} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2c_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right), \\ \tau_{x_1 x_2}(x_1, x_2, t) &= -x_3 \left(c_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2c_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right), \end{aligned} \qquad 4)$$

где $-\frac{h}{2} \le x_3 \le \frac{h}{2}$.

Соотношения (3) и (4) позволяют исследовать пространственно-временное деформированное и напряженное состояние неограниченной тонкой упругой анизотропной пластины Кирхгофа при воздействии нестационарного движущегося давления, распределенного по прямоугольной площадке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00217).

Список литературы

1 **Горшков, А. Г.** Волны в сплошных средах / А. Г. Горшков. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.

2 **Tarlakovskii, D. V.** Nonstationary 3D motion of an elastic spherical shell / D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenkov // Mechanics of Solids. – 2015. – Vol. 50. – No. 2. – P. 208–2017. – DOI: 10.3103/S0025654415020107.

3 **Локтева, Н. А.** Нестационарная динамика тонких анизотропных упругих цилиндрических оболочек / Н. А. Локтева, Д. О. Сердюк, П. Д. Скопинцев // Динамические и технологические проблемы Механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 90–91.

4 **Сердюк А. О.** Функция Грина для неограниченной тонкой анизотропной пластины / А. О. Сердюк, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // Динамические и технологические проблемы Механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 106–108.

5 **Сердюк А. О.** Функция влияния для пластины с произвольной анизотропией материала / А. О. Сердюк, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 108–110.

УДК 621.643.412

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПЛОСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫМИ ПРОКЛАДКАМИ

Е. В. СЕРПИЧЕВА[1], С. В. ШИШКИН[1], Г. В. ФЕДОТЕНКОВ[1,2]
[1]Московский авиационный институт (НИУ)
[2]НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

В авиационной технике широко используются фланцевые соединения с плоскими уплотнительными прокладками, прочность и герметичность которых нередко определяет безопасность и работоспособность различных конструкций. В эксплуатации магистрали подвергаются циклическому и динамическому нагружению. Поэтому при прочих равных условиях их усталостная прочность зависит от массы соединений. Однако нерациональное снижение жесткости фланцев приводит к существенному увеличению неравномерности давления на прокладку. Отсюда, есть вероятность, как раскрытия стыка, так и разрушения уплотнения из-за превышения допустимой величины контактной нагрузки.

При проектировании соединений минимальной массы возникает необходимость разработки методики проверочного расчета его деталей на прочность. Подобная постановка задачи определяет предельную деформацию изгиба фланцев при затяжке болтов и приложении рабочей нагрузки. Рационально спроектированные конструкции отличаются довольно низким коэффициентом основной нагрузки, что благоприятно влияет на усталостную прочность болтов. При невысоких температурах и рабочих нагрузках используют неметаллические прокладки с целью дальнейшего снижения массы узла. В этих конструкциях применяют нежёсткие фланцы, поскольку их изгиб компенсируется податливостью уплотнения. Низкая величина допускаемого давления на прокладку определяет относительно невысокие усилия затяжки болтов. Это позволяет ставить более лёгкий крепёж и уменьшить радиальный габарит фланцев.

Приближённый анализ распределения давления в герметизируемом стыке контактной нагрузки с достаточной точностью может быть сделан на упрощенных моделях фланцев в виде колец. Такая схематизация реальных деталей оказывается возможной при условии разделения их деформаций на общие (изгиб) и местные (сжатие фланцев и прокладки) и их определении изолированно друг от друга. Указанный подход позволяет использовать известные уравнения теории осесимметричной деформации кольца, связывающие перемещения точек расчётной модели с действующими на неё усилиями.

В работе рассмотрена кольцевая модель соединения с учетом дополнительной жесткости крепежа и присоединительных труб с независимым граничным слоем, податливость которого определяется сжатием фланцев, прокладки и деформацией шероховатости уплотняемых поверхностей.

Построена функция распределения контактного давления по радиусу уплотнения, показано, что она имеет линейный характер в зависимости от затяжки болтов и приложения рабочей нагрузки, а её неравномерность зависит от жёсткости фланцев и общей податливости граничного слоя расчетной модели.

Выработаны основные рекомендации по проектированию компактных, конструкций фланцевых соединений с плоскими уплотнительными прокладками с целью минимизации их массы и сформулированы базовые критерии прочности деталей узла, гарантирующие его работоспособность.

Показано, что в соединениях с нежесткими фланцами целесообразно использовать неметаллические уплотнения, высокая податливость которых компенсирует из-за плоских тарелок и обеспечивает требуемую неравномерность контактной нагрузки в уплотняемом стыке.