ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.925.8:628.952

С. Н. ЛИТУНОВ
Н. В. РЕВЗИНА
В. Ю. ЮРКОВ

Омский государственный
технический университет
Омский государственный
институт сервиса

КОНСТРУИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

В статье рассмотрен алгоритм геометрического моделирования криволинейного рефлектора, порождающего поток отраженной энергии, компенсирующий неравномерный характер прямого облучения. Построение линейной картины приведет к решению пространственной задачи. Математические модели визуализированы при помощи программного обеспечения CorelDraw.

Ключевые слова: свет, аппарат отражения, рефлектор, интенсивность излучения.

Отражатели лучистой энергии применяются в широком диапазоне отраслей промышленности. В технических устройствах рефлекторы перераспределяют световой поток, рассеивая, концентрируя или перенаправляя его в соответствии с заданной целью. В полиграфии используют светонаправляющие конструкции для УФ-ламп, которые применяются для всех видов печати и лакирования на экспонирующем оборудовании, в офсетных копировальных рамах, УФ-полимеризации [1]. Оптимальное использование световой энергии при УФ-сушке определяет необходимую мощность ламп, а значит, затраты на производство и скорость изготовления продукции. Рефлекторы перераспределяют лучистый поток, находясь на малом расстоянии от принимающей поверхности и источника излучения. Для того чтобы суммарная функция дополнительной освещенности была достаточно равномерной, требуется эффективное конструкторское решение [2].

Основная сложность заключается в том, чтобы найти такое положение источника S, а также положение и форму отражателя L, при которых отраженная энергия компенсировала бы неравномерный

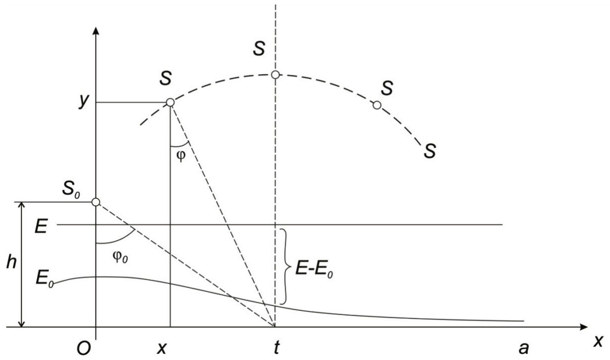


Рис. 1. Расчетная схема криволинейного отражателя

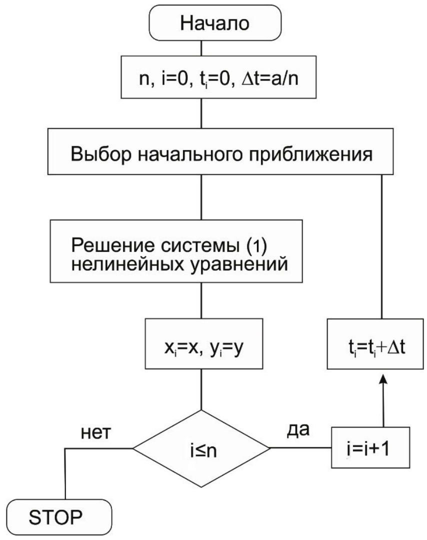


Рис. 2. Алгоритм нахождения точек кривой отражателя

характер прямого освещения. На практике такая задача может решаться различными способами. Рассмотрим случай, когда длина облучаемой поверхности значительно больше размеров источника излучения, отражатель имеет криволинейную геометрию, а функция энергетической освещенности задана постоянной.

Пусть на отрезке $[o,\ a]$ стационарный источник S_0 дает энергетическую освещенность E_0. В точке t, $0 \le t \le a$, она равна

$$E_0(t) = \frac{I \cdot \cos\varphi_0}{t^2 + h^2}$$

или, если

$$cos\varphi_0 = \frac{h}{\sqrt{t^2 + h^2}},$$

то

$$E_0(t) = \frac{I \cdot h}{\left(t^2 + h^2\right)^{3/2}}.$$

Расчетная схема приведена на рис. 1.

Пусть E=const — требуемая энергетическая освещенность $E \ge E_0(0)$. Можно принять $E = k \cdot E_0(O) = k \cdot \dfrac{I}{h^2}$, где k — коэффициент, характеризующий отличие между прямой освещенностью и требуемой, $1< k <2$.

Дополнительную освещенность в точке t будет создавать мнимый источник S, который может располагаться в любой точке некоторой кривой S, симметричной относительно прямой $x=t$.

Дополнительная освещенность равна $E - E_0 = \dfrac{I \cdot \cos\varphi}{(t-x)^2 + y^2}$ или, если $\cos\varphi = \dfrac{y}{\sqrt{(t-x)^2 + y^2}}$, то $E - E_0 = \dfrac{I \cdot y}{\left[(t-x)^2 + y^2\right]^{3/2}}$.

Таким образом, $k \cdot \dfrac{I}{h^2} - \dfrac{I \cdot h}{\left(t^2 + h^2\right)^{3/2}} = \dfrac{I \cdot y}{\left[(t-x)^2 + y^2\right]^{3/2}}$

есть уравнение кривой S — геометрического места мнимых источников $S(x,y)$ для заданного параметра t. При изменении t эти кривые образуют семейство, зависящее от параметра t. Следовательно, дифференцируя это уравнение по параметру t, получим огибающую этого семейства.

Эта огибающая есть криволинейный отражатель, дающий равномерную освещенность на отрезке $[o,\ a]$.

Уравнение огибающей имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{k}{h^2} - h\left(t^2 + h^2\right)^{-3/2} - y\left[(t-x)^2 + y^2\right]^{-3/2} = 0 \\ h\left(t^2 + h^2\right)^{-5/2} \cdot t + y\left[(t-x)^2 + y^2\right]^{-5/2} \cdot (t-x) = 0. \end{cases} \qquad \textbf{(1)}$$

Если из этой системы выразить t, то получим уравнение огибающей в явном виде: $y=f(x)$.

Однако сделать это, очевидно, не удастся. Поэтому можно предложить следующий алгоритм (рис. 2).

Для выбора начального приближения можно положить $x=t$ и из первого уравнения системы $\dfrac{k}{h^2} - h\left(t^2 + h^2\right)^{-3/2} - \dfrac{1}{y^2} = 0$ получить значение y:

$$y = \frac{h}{\sqrt{k - h^3\left(t^2 + h^2\right)^{-3/2}}},\ y > 0. \qquad \textbf{(2)}$$

В результате работы алгоритма будет получено множество точек $(x_0 y_0)$, .., $(x_n y_n)$ огибающей, то есть множество мнимых источников $S_0, .., S_n$. Каждый из них создает энергетическую освещенность в определенной точке $t_0, .., t_n$ отрезка $[o,a]$.

Второй этап заключается в получении множества точек $L_0, .., L_n$ криволинейного отражателя.

При этом должно соблюдаться условие взаимного однозначного соответствия между множествами $\{S_i\}$ и $\{L_i\}$.

Точки L_i получаются по схеме, представленной на рис. 3.

Уравнение прямой SS_i:

$$y = \frac{y_{Si} - h}{x_{Si}} \cdot x + h. \qquad \textbf{(3)}$$

Уравнение прямой $S_i t$:

$$y = \frac{y_i}{x_i - t} \cdot x - \frac{y_i \cdot t}{x_i - t}. \qquad \textbf{(4)}$$

Уравнение прямой l_i:

$$y = \frac{x_i}{h - y_i} \cdot x + \frac{h^2 - y^2_i - x_i^2}{2\left(h - y_i\right)}. \qquad \textbf{(5)}$$

Из двух последних уравнений определяются координаты точки L_i:

$$x_{Li} = \frac{\left(h^2 - y_i^2 - x_i^2\right)\left(x_i - t\right) + 2t \cdot y_i\left(h - y_i\right)}{2 \cdot y_i\left(h - y_i\right) - 2x_i\left(x_i - t\right)},$$

$$y_{Li} = \frac{y_i}{x_i - t} \cdot x_{Li} - \frac{y_i \cdot t}{x_i - t}. \qquad \textbf{(6)}$$

В результате будет получено множество точек $\{L_i\}$, $i=0,..,n$, отражателя. При этом в каждой точке L_i определена касательная l_i.

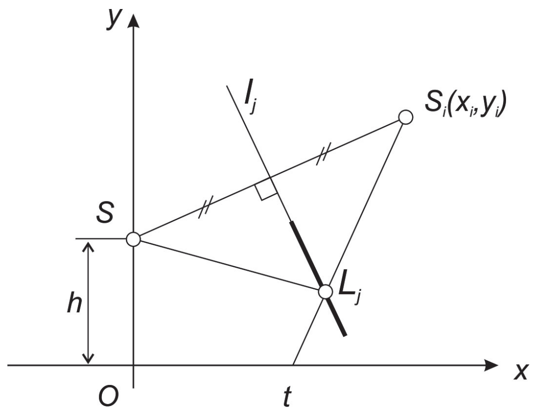


Рис. 3. Схема построения точек L_i

Задачей первого этапа является представление множества $\{(L_i,l_i)\}$ в виде непрерывной гладкой кривой. Возможны следующие варианты:

1) представление в виде многочлена

$$y=P(x) \text{ степени } 2n;$$

2) представление в виде сплайна

$$y=\bigcup_{k=1}^{n-1} P_{3_1 k}(x) \text{ дефекта } 2;$$

3) представление в виде сплайна, различные участки которого являются многочленами разных степеней.

Вернемся к системе (1). Теоретически можно решить эту систему относительно x и y:

$$x=x(t),\ y=y(t).$$

Практически — множество точек $(x_0y_0),\ldots,(x_ny_n)$ интерполировать многочленами $X(t)$, $Y(t)$ подходящей степени. Тогда получим однопараметрическое множество прямых l_i:

$$\frac{X(t)}{h-Y(t)}\cdot x-y+\frac{h^2-Y^2(t)-X^2(t)}{2(h-Y(t))}=0 \qquad (7)$$

Дифференцируя это уравнение по t, получим систему уравнений

$$2\cdot X(t)\cdot x-2\big(h-Y(t)\big)\cdot y+ \\ +\big(h^2-Y^2(t)-X^2(t)\big)=0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} 2\cdot X(t)\cdot x-2\big(h-Y(t)\big)\cdot y+ \\ +\big(h^2-Y^2(t)-X^2(t)\big)\end{bmatrix}=0, \qquad (8)$$

из которой, теоретически, можно получить уравнение отражателя в явном виде $y=f(x)$.

Практически придется решать систему (8), задавая значения $t_0,\ldots,t_n$ и получая множество точек $L_0(x_0,y_0),\ldots,L_n(x_n,y_n)$. После этого снова возвращаемся к пунктам 1, 2, 3, описанным выше.

Проверим выполнимость начальных условий, которые появляются при проектировании отражателя. Пусть $t=0$. Тогда $x=0$ и система уравнений (1) становится одним уравнением $\frac{k}{h^2}-\frac{1}{h^2}-\frac{1}{y^2}=0$, отсюда $y^2=\frac{h^2}{k-1}$ и $y=\frac{h}{\sqrt{k-1}}$.

То есть $y>h$ и $\frac{dy}{dx}=0$.

Уравнение прямой l_0 будет:

$$y=\frac{h+y_0}{2}=\frac{h+\frac{h}{\sqrt{k-1}}}{2}=\frac{h}{2}+\frac{1}{2\sqrt{k-1}}. \qquad (9)$$

Пусть $t=a$. Мнимый источник излучения Sn (xn,yn) создает освещенность в точке $t=a$. Точка отражателя Ln (a,o) совпадает с концом облучаемого отрезка. Эти условия аналитически записываются в виде уравнения окружности — геометрического места точек Sn:

$$(x-a)^2+y^2=a^2+h^2. \qquad (10)$$

Система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{k}{h^2}-h\left(a^2+h^2\right)^{-3/2}-y\left((x-a)^2+y^2\right)^{-3/2}=0 \\ h\left(a^2+h^2\right)^{-5/2}\cdot a+y\left((x-a)^2+y^2\right)^{-5/2}(a-x)=0 \\ (x-a)^2+y^2=a^2+h^2 \end{cases}. \qquad (11)$$

Отсюда

$$y_n=\frac{k}{h^2}\sqrt{\left(a^2+h^2\right)^3}-h>0,$$

$$x_n=\frac{a\sqrt{\left(a^2+h^2\right)^3}}{\sqrt{\left(a^2+h^2\right)^3-\frac{h^3}{k}}}>a. \qquad (12)$$

Тем самым доказано существование криволинейного отражателя, дающего равномерное облучение круговой области.

Определим пределы изменения длины отрезка $[o,\ a]$. Из условия $y_n=h$ имеем $\frac{k}{h^2}\sqrt{\left(a^2+h^2\right)^3}-h=h$ или $a=\sqrt{\left(\frac{4}{k^2}\right)^{1/3}-1}\cdot h=a_{\max}$.

То есть $0<a<\sqrt{\left(\frac{2}{k}\right)^{2/3}-1}\cdot h$.

Таким образом, достигается поставленная цель определения геометрии конструкции, позволяющей компенсировать неравномерный характер прямого облучения с помощью отраженной энергии в случае, когда длина облучаемой поверхности значительно больше размеров источника излучения, отражатель имеет криволинейную геометрию, а функция энергетической освещенности задана постоянной. Техническим результатом, достигаемым применением устройства, является повышение производительности и ресурсосбережение.

Библиографический список

1. Гуторов, М. М. Основы светотехники и источники света : учеб. пособие для вузов / М. М. Гуторов. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — С. 311—318.

2. Толивер-Нигро, Х. Технологии печати : учеб. пособие для вузов / Х. Толивер-Нигро ; пер. с англ. Н. Романова. — М. : Принт-медиа центр, 2006. — 73 с.

ЛИТУНОВ Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры оборудования и технологии полиграфического производства Омского государственного технического университета.
Адрес для переписки: Litunov@rambler.ru

РЕВЗИНА Наталия Владимировна, аспирантка кафедры «Конструирование и технологии изделий лёгкой промышленности» Омского государственного института сервиса (ОГИС).
Адрес для переписки: NRevzina@mail.ru
ЮРКОВ Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии изделий лёгкой промышленности» ОГИС.
Адрес для переписки Viktor_Yurkov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2014 г.

УДК 514.185.2

В. А. КОРОТКИЙ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ ЕЕ ОТОБРАЖЕНИЯ НА ЧЕТЫРЕХМЕРНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Рассмотрен способ построения поверхности, проходящей через замкнутый контур, основанный на повышении размерности объемлющего пространства. Для конструктивной реализации соответствующего графического алгоритма используется гиперэпюр Наумович. Даны примеры построения поверхности, проходящей через трех- и четырехзвенный контуры, образованные плоскими кривыми линиями.

Ключевые слова: начертательная геометрия, гиперэпюр Наумович, обобщенный чертеж Монжа, гладкая поверхность на замкнутом контуре, цилиндроид, коноид.

Одним из способов моделирования поверхностей является ключевой способ, в соответствии с которым определитель поверхности содержит некоторое геометрическое условие («ключ»), посредством которого задается закон изменения формы образующей. Ключ проекционно связан с главными видами, что позволяет рассматривать чертеж с изображением ключа как чертеж двумерной поверхности, находящейся в четырехмерном пространстве, на что впервые обратил внимание профессор И. И. Котов [1]. Обобщенная трактовка всех ключевых способов формирования поверхности как задачи начертательной геометрии четырехмерного пространства E^4 дана в [2].

Постановка задачи. *В расширенном евклидовом пространстве xyz имеется замкнутый четырехзвенный контур, заданный плоскими кривыми линиями AB, BC, CD, DA, лежащими в плоскостях* σ, τ, η, ρ *соответственно* (рис. 1). *Требуется сформировать гладкую (всюду дифференцируемую) поверхность, проходящую через данный контур.*

В трехмерном пространстве задачу следует считать неопределенной [1, 2]. Для устранения неопределенности предлагается выполнить отображение плоскостей σ, τ, η, ρ, вместе с находящимися в них звеньями контура ABCD, на четырехмерное пространство $E^4(xyzt)$. С этой целью отмечаем в каждой из плоскостей три произвольные точки и «выносим» их из $\Gamma(xyz)$ в E^4, присваивая им произвольные координаты по оси t. Например, на рис. 2 точкам $1 = x\cap\sigma$, $2 = y\cap\sigma$, $3 = z\cap\sigma$, имеющим нулевые значения координаты t, поставлены в соответствие точки 1_0, 2_0, 3_0 (с произвольными, отличными от нуля значениями координаты t), определяющие плоскость σ_0 в пространстве E^4. При этом реализуется биекция (взаимно однозначное отображение) множества точек плоскости σ как прообраза, вложенного в трехмерное пространство Γ, на множество точек образа — плоскости σ_0, лежащей в E^4. Плоскости σ и σ_0, пересекаясь по прямой MNK, принадлежащей гиперплоскости $\Gamma(xyz)$, в свою очередь определяют в E^4 некоторую гиперплоскость $T(\sigma\cap\sigma_0)$, содержащую несобственную точку T^∞ координатной оси t. Взаимно однозначное отображение $\sigma\leftrightarrow\sigma_0$ обеспечивается проецированием точек плоскостей σ, σ_0 друг на друга пучком проецирующих прямых $1-1_0$, $2-2_0$, $3-3_0$,... с центром в точке T^∞. Все проецирующие прямые вложены в гиперплоскость T. Плоское криволинейное звено $ASB\subset\sigma$ отображается в звено $A_0S_0\ B_0\subset\sigma_0$ (см. рис. 2).

Отображая плоскости всех звеньев контура ABCD на $E^4(xyzt)$, получаем некоторый замкнутый контур $w_0=A_0B_0C_0D_0$, размещенный в четырехмерном пространстве. Исходный контур ABCD будем считать ортогональной проекцией контура w_0 на гиперплоскость $\Gamma(xyz)$; при этом формулировка поставленной задачи изменяется.

В расширенном евклидовом четырехмерном пространстве $E^4(xyzt)$ *дан замкнутый контур* $w_0=A_0B_0C_0D_0$, *образованный плоскими криволинейными звеньями. Плоскости* σ_0, τ_0, η_0, ρ_0 *звеньев* A_0B_0, B_0C_0, C_0D_0, D_0A_0 *пересекаются в узлах* A_0, B_0, C_0, D_0

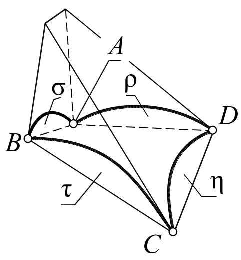


Рис. 1

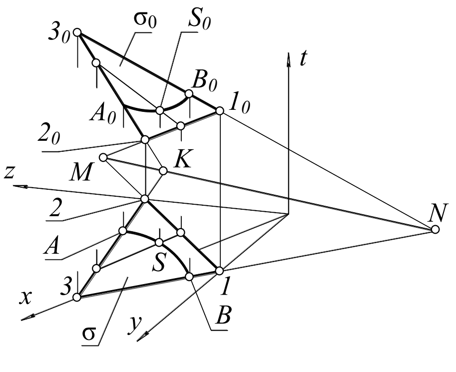


Рис. 2

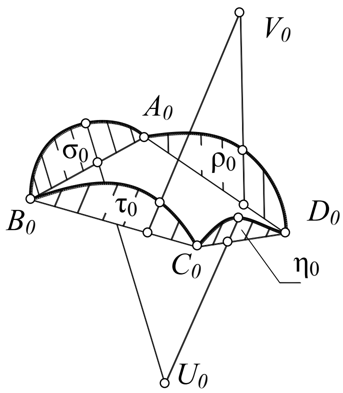


Рис. 3

(рис. 3). *Требуется составить алгоритм построения двумерной поверхности, проходящей через контур w_0.*

В отличие от исходной задачи, сформулированной для пространства Г(xyz), в пространстве E^4(xyzt) может быть конструктивно реализовано закономерное построение точек и линий поверхности, проходящей через данный контур. Решением исходной задачи является ортогональная проекция этой поверхности на гиперплоскость Г(xyz).

Алгоритм построения поверхности в четырехмерном пространстве. В пространстве E^4(xyzt) дан замкнутый контур $w_0=A_0B_0C_0D_0$, на который надо «натянуть» двумерную поверхность (см. рис. 3).

1. Отмечаем точки пересечения $U_0=\sigma_0\cap\eta_0$, $V_0=\tau_0\cap\rho_0$ плоскостей противолежащих звеньев. Назовем их базисными точками (базисом) контура w_0 в четырехмерном пространстве.

2. Между точками каждой пары противолежащих звеньев устанавливаем взаимно однозначное соответствие, описываемое некоторой функцией соответствия φ. Пусть соответствие точечных рядов звеньев A_0B_0 и C_0D_0 описывается функцией φ_1, где $A_0\leftrightarrow D_0$, $B_0\leftrightarrow C_0$, а звеньев A_0D_0 и B_0C_0 — функцией φ_2, где $A_0\leftrightarrow B_0$, $D_0\leftrightarrow C_0$.

3. Формируем в пространстве E^4 два пучка (одномерных множества) вспомогательных плоскостей δ и ω. Плоскости пучка δ, включая в себя ρ_0 и τ_0, проходят через базисную точку $V_0=\tau_0\cap\rho_0$ и через пары соответственных в φ_1 точек звеньев A_0B_0 и C_0D_0. Плоскости пучка ω, включая в себя σ_0 и η_0, проходят через $U_0=\sigma_0\cap\eta_0$ и через пары соответственных в φ_2 точек звеньев A_0D_0 и B_0C_0. Две произвольные плоскости одного пучка пересекаются между собой только в его базисной точке.

4. Точки пересечения плоскостей разных пучков образуют двумерную поверхность в четырехмерном пространстве, натянутую на контур w_0 (доказательство см. [2]).

Покажем, что на этой поверхности располагается два семейства образующих. Пучок δ плоскостей, проходящих через V_0 и управляемых функцией φ_1, пересекая какую-либо фиксированную плоскость ω_i пучка ω, определяет однопараметрическое множество точек — плоскую криволинейную образующую, лежащую в плоскости ω_i. Множеству ∞^1 плоскостей пучка ω соответствует ∞^1 не пересекающихся между собой образующих одного семейства. Аналогично в каждой из ∞^1 плоскостей пучка δ формируется образующая другого семейства. Через любую точку поверхности, натянутой на контур w_0, проходит одна образующая первого семейства и одна образующая второго семейства. Многообразие функций соответствия φ_1, φ_2 порождает многообразие двумерных поверхностей в E^4, проходящих через контур w_0.

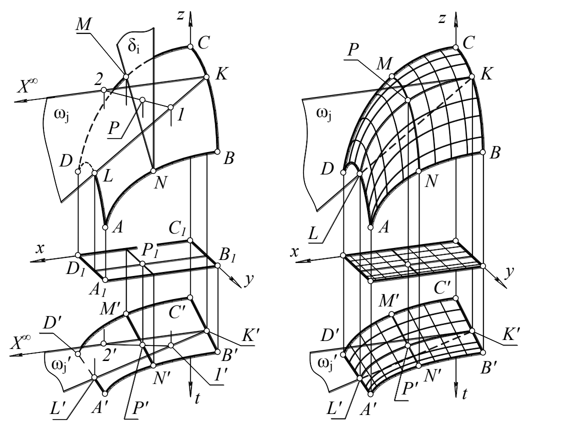
Пример. В пространстве Г(xyz) дан прямоугольный в плане четырехзвенный контур ABCD, через который требуется провести поверхность.

Присвоим узлам контура произвольные координаты по оси t и изобразим его на гиперэпюре Наумович, состоящем из двух трехмерных проекций узлов контура на «фронтальную» Г(xyz) и «горизонтальную» Г′(xyt) гиперплоскости проекций (рис. 4а).

При отображении контура на четырехмерное пространство требуется однозначно определить не только положение узлов в E^4, но и положение плоскостей, содержащих звенья контура. Для этого необходимо в четырехмерном пространстве указать (выбрать) положения базисных точек U_0, V_0, в которых пересекаются плоскости противолежащих звеньев. Этот выбор, от которого зависит форма конструируемой поверхности, может быть сделан с большой степенью произвола.

В рассматриваемом примере базисные точки выбраны следующим образом: плоскости σ_0 и η_0, содержащие звенья A_0B_0 и C_0D_0, пересекаются в несобственной точке $U_0=X^\infty$ оси x, а плоскости $\rho_0(A_0D_0)$ и $\tau_0(B_0C_0)$ пересекаются в несобственной точке $V_0=Z^\infty$ оси z. В этом случае проекции на Г′(xyt) плоскостей ρ_0 и τ_0 вместе с содержащимися в них звеньями A_0D_0, B_0C_0 вырождаются в прямые линии [3], а проекции на Г′ звеньев A_0B_0 и C_0D_0 определяются по общему правилу: если линия принадлежит плоскости, то проекция линии принадлежит проекции плоскости.

Таким образом, выполнено отображение замкнутого контура ABCD, расположенного в трехмерном пространстве Г(xyz), на пространство четырех измерений E^4. Между точками «прообраза» ABCD Г(xyz) и точками «образа» $A_0B_0C_0D_0$ E^4 установлено взаимно однозначное соответствие. Гиперэпюр (двухпроекционный трехмерный чертеж) контура



а) б)

Рис. 4

$w_0 = A_0B_0C_0D_0$ удовлетворяет основному требованию, предъявляемому к чертежу геометрической фигуры: по одной проекции точки, принадлежащей контуру или плоскости какого-либо его звена, может быть построена вторая проекция этой точки.

После выбора базисных точек, следует, согласно рассмотренному выше алгоритму, задать функции φ_1, φ_2, определяющие взаимно однозначное соответствие точечных рядов противолежащих звеньев контура $A_0B_0C_0D_0$. В рассматриваемом примере для указания этих соответствий использованы гиперплоскости уровня. Так, соответственные в φ_1 точки на противолежащих звеньях A_0B_0, C_0D_0 выделяются как точки пересечения этих звеньев гиперплоскостями уровня $x=\mathrm{const}$, параллельными координатной гиперплоскости yzt, а соответственные в φ_2 точки звеньев A_0D_0, B_0C_0 получаются в пересечении их гиперплоскостями уровня $y=\mathrm{const}$, параллельными гиперплоскости xzt.

Определив функции соответствия, получаем пучки вспомогательных плоскостей δ и ω. Произвольная плоскость δ_i пучка δ определена базисной точкой $V_0=Z^\infty$ и парой соответственных в φ_1 точек M_0, N_0. Проекция этой плоскости на $\Gamma'(xyt)$ вырождается в прямую $M'N'$. Произвольная плоскость ω_j пучка ω определяется точкой $U_0=X^\infty$ и парой соответственных в φ_2 точек K_0, L_0, заданных на гиперэпюре своими проекциями K, L и K′, L′ (см. рис. 4а).

Точка P_0 пересечения плоскостей δ_i и ω_j принадлежит искомой поверхности, проходящей через контур w_0 в четырехмерном пространстве. Для построения этой точки на гиперэпюре достаточно найти «горизонтальную» проекцию P′ точки P_0 как точку пересечения «горизонтальных» проекций $\delta_i'=M'N'$ и $\omega_j'=K'L'X^\infty$ плоскостей δ_i и ω_j, и затем построить «фронтальную» проекцию P этой точки из условия принадлежности ее к плоскости ω_j. На гиперэпюре это построение выполнено с помощью вспомогательной прямой 1−2, лежащей в ω_j.

Многократно повторяя указанное построение, получаем поверхность как двупараметрическое множество точек. Каждой точке P_1 плана (плоскости xy) ставится в соответствие единственная точка P_0(P, P′) поверхности, через которую проходят две образующие M_0N_0(MN, M′N′) и K_0L_0(KL, K′L′) (рис. 4б).

В рассматриваемом примере «горизонтальная» проекция поверхности на гиперплоскость $\Gamma'(xyt)$ — цилиндроид с направляющими A′B′, C′D′ и плоскостью параллелизма yt. Если звенья AB и CD контура ABCD — алгебраические кривые второго порядка, то их проекции A′B′, C′D′ также будут кривыми второго порядка, а поверхность цилиндроида — поверхностью восьмого порядка [4], в сечении которой плоскостью ω_j' получается алгебраическая кривая K′L′ восьмого порядка (см. рис. 4б). На гиперэпюре точечные поля ω_j и ω_j', вложенные в гиперплоскости $\Gamma(xyz)$, $\Gamma'(xyt)$, находятся в перспективно-аффинном (родственном) соответствии, поэтому порядок образующей KL в исходном пространстве $\Gamma(xyz)$ также равен восьми.

Конструктивное решение задачи может быть реализовано не только на гиперэпюре Наумович, но и на плоской проекционной модели — обобщенном чертеже Монжа, где проекция контура на плоскость yt может быть названа «трапецеидальным ключом» (рис. 5). Очевидно, такой чертеж менее нагляден по сравнению с гиперэпюром. Гиперэпюр, в отличие от чертежа Монжа, имеет минимальную разность между размерностями исходного и картинного пространств, вследствие чего обладает преимуществами в простоте и наглядности при конструктивном решении задач в пространстве E^4. Эти преимущества могут быть эффективно реализованы на компьютере в связи с развитием программных графических средств, позволяющих выполнять точные построения на компьютерных аксонометрических моделях фигур, условно называемых «3D-макетами».

Сравнение с ключевым способом. Требуется построить отсек судовой поверхности, ограниченный палубной линией BC, килевой линией AD и шпангоутами AB, CD. В соответствии с прогрессическим ключевым способом, вводится треугольный «ключ» $A_4B_4C_4$, проекционно связанный с фронтальной и горизонтальной проекциями контура ABCD (рис. 6а). Далее проводят прямые M_2N_2, K_1L_1 и с помощью линий связи вычерчивают на «ключе» отрезки M_4N_4 и K_4L_4, пересекающиеся в точке P_4. Эту точку переносят с помощью линий связи на прямые M_2N_2, K_1L_1 и считают полученную точку P (P_2, P_1) принадлежащей конструируемой поверхности. Покажем, что здесь неявно реализован

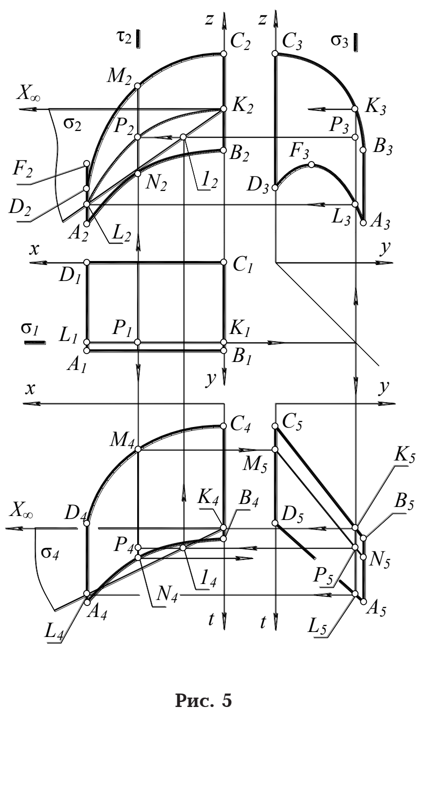
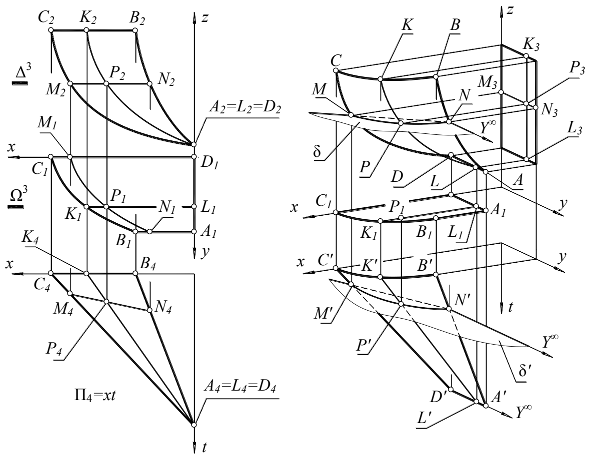


Рис. 5



а) б)

Рис. 6

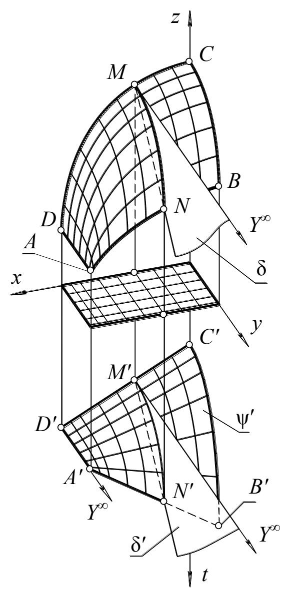


Рис. 7

рассмотренный выше алгоритм построения поверхности в пространстве E^4. Действительно, на рис. 6а представлена плоская проекционная модель контура $w_0 = A_0B_0C_0D_0$, расположенного в E^4, у которого плоскости противолежащих звеньев $\sigma(AB)$ и $\eta(CD)$ пересекаются в базисной точке $U_0 = Z^\infty$, а плоскости $\tau(BC)$ и $\rho(AD)$ — в базисной точке $V_0 = Y^\infty$. Поскольку плоскости σ и η инцидентны точке Z^∞, то они изображаются на $\Gamma'(xyt)$, а следовательно, и на $\Pi_4 = xt$ прямыми линиями.

Функциональные соответствия φ_1, φ_2 между точками противолежащих звеньев установлены посредством гиперплоскостей уровня, параллельных гиперплоскостям проекций xyt и xzt. Например, гиперплоскость $\Delta^3 \| xyt$ пересекает звенья AB, CD в точках N, M (функция соответствия φ_1), которые совместно с базисной точкой Y^∞ определяют плоскость δ. Гиперплоскость $\Omega^3 \| xzt$ высекает на противолежащих звеньях BC и AD соответственные в φ_2 точки K, L, определяющие (совместно с базисом Z^∞) плоскость ω. Точка пересечения P плоскостей $\delta(MNY^\infty)$ и $\omega(KLZ^\infty)$ принадлежит моделируемой поверхности. Эти плоскости изображаются на $\Pi_4 = xt$ прямыми M_4N_4 и K_4L_4, точка пересечения которых определяет проекцию P_4 искомой точки $P = \delta \cap \omega$.

Таким образом, в рамках ключевого способа построение точки на поверхности сводится к построению точки пересечения двух прямых (см. рис. 6а). Это решение полностью, без каких-либо изменений, с теми же базисными точками и функциями соответствия реализовано на гиперэпюре (рис. 6б).

Частный случай. Пусть палубная линия BC — кривая второго порядка. Тогда проекция искомой поверхности на пространство $\Gamma'(xyt)$ — линейчатая алгебраическая поверхность четвертого порядка (коноид с плоскостью параллелизма xt), в сечении которой плоскостью δ' получаем кривую четвертого порядка $M'P'N'$ [4]. Точечные поля плоскостей $\delta' \subset \Gamma'(xyt)$ и $\delta \subset \Gamma(xyz)$ проекционно связаны, поэтому в пространстве $\Gamma(xyz)$ образующая MPN (бортовой стрингер) — кривая четвертого порядка (см. рис. 6б).

Покажем, что, в отличие от классического ключевого способа, применение способа выхода в пространство E^4 позволяет сформировать продольный силовой набор поверхности из участков кривых не четвертого, а второго порядка.

Повернем контур ABCD конструируемого отсека таким образом, чтобы плоскость τ палубной линии BC совместилась с yz. Выносим контур в E^4, придав узлам произвольные значения координат по оси t (рис. 7). Выбираем базисные точки: $V_0 = Y^\infty = \tau(BC) \cap \rho(AD)$, $U_0 = Z^\infty = \sigma(AB) \cap \eta(CD)$. Устанавливаем соответствие φ_1 между точками звеньев AB и CD посредством вспомогательных гиперплоскостей уровня $x = \mathrm{const}$, а соответствие φ_2 между звеньями BC и AD — с помощью гиперплоскостей $y = \mathrm{const}$.

Пара соответственных в φ_1 точек, «бегущих» по звеньям AB и CD, совместно с базисной точкой Y^∞ определяет пучок плоскостей δ, «пробегающих» от плоскости палубы до киля. Аналогично, множество пар соответственных в φ_2 точек и базисная точка Z^∞ определяют пучок плоскостей ω, «пробегающих» между шпангоутами AB и CD.

Множество ∞^2 точек пересечения плоскостей пучков δ и ω определяет в E^4 искомую поверхность, проекция которой на $\Gamma'(xyt)$ — коноид ψ' с плоскостью параллелизма xt и направляющей коникой $B'C'$. В подпространстве $\Gamma'(xyt)$ плоскость $\delta'(M'N'Y^\infty)$ пересекается с коноидом ψ' по кривой второго порядка $M'N'$ (см. рис. 7). Для доказательства этого утверждения рассмотрим лемму.

Лемма. Пусть линейчатая поверхность Θ задана направляющей кривой второго порядка e и двумя прямолинейными направляющими g, q, пересекающимися с плоскостью Σ коники e в точках G, Q. Тогда плоскость δ, проходящая через GQ, пересекается с Θ по кривой второго порядка.

Доказательство. Прямая GQ пересекает направляющую e в двух точках (действительных, совпавших или мнимых сопряженных), а также пересекает направляющие g, q. Следовательно, прямая GQ представляет собой две совпавшие образующие поверхности Θ. Линейчатая поверхность Θ — алгебраическая поверхность четвертого порядка [4], в сечении которой плоскостью δ получаем кривую четвертого порядка, распавшуюся на считаемую дважды прямую GQ и на кривую второго порядка, ч.т.д.

Коноид $\psi' \subset \Gamma'(xyt)$ — поверхность четвертого порядка с направляющей коникой $B'C' \subset yt$ и прямолинейными направляющими $A'D'$, $l^\infty = X^\infty T^\infty$, которые пересекают плоскость yt направляющей коники в точках Y^∞, T^∞ соответственно (здесь X^∞, Y^∞, T^∞ — несобственные точки координатных осей x, y, t). Плоскость δ′ проходит через $Y^\infty T^\infty$ (так как δ′||yt), следовательно, в соответствии с леммой, в сечении коноида ψ′ этой плоскостью возникает участок кривой второго порядка M′N′ (см. рис. 7). Точечные поля δ′ и δ, вложенные в гиперплоскости проекций Γ′(xyt) и Γ(xyz), связаны на гиперэпюре перспективно-аффинным соответствием, поэтому в исходном пространстве xyz кривая $MN \subset \delta$ также будет участком коники. Множество плоскостей пучка δ индуцирует множество продольных образующих (кривых второго порядка MN) моделируемого отсека поверхности.

Таким образом, если палубная линия BC — участок коники, то, независимо от формы шпангоутов AB и CD, отсек ABCD конструируемой поверхности может быть образован движением дуги кривой второго порядка MN по направляющим AB, CD. При этом форма образующей MN меняется от палубной линии BC до прямолинейного киля AD (см. рис. 7).

Поверхность на трехзвенном контуре. Во всех вариантах ключевого способа решается задача построения поверхности на четырехзвенном контуре. Покажем, что если одну из вершин трехзвенного контура считать выродившимся в точку четвертым звеном, то рассматриваемый обобщенный алгоритм построения поверхности посредством отображения ее на пространство E^4, в отличие от ключевого способа, полностью сохраняет свою конструктивную определенность. Пусть требуется построить поверхность, проходящую через контур ABC. Присваивая узлам произвольные значения координат по оси t, получаем контур $A_0B_0C_0$ в E^4. Положим $\sigma_0(A_0C_0) \cap \eta_0(B_0C_0) = C_0Z^\infty$, $\tau_0(A_0B_0) \cap \rho_0(C_0) = X^\infty$, где $\rho_0(C_0)$ — плоскость выродившегося в точку C_0 звена, противолежащего звену A_0B_0. При таком выборе базисных инциденций плоскости звеньев A_0C_0, B_0C_0 и сами звенья проецируются на Γ′(xyt) прямыми A′C′ и B′C′, а проекция на Γ′ звена A_0B_0 определяется из условия его принадлежности плоскости $\tau_0(A_0B_0X^\infty)$ (рис. 8).

Формируем в E^4 два пучка вспомогательных плоскостей. Будем полагать, что плоскости ω_i пучка ω с осью C_0Z^∞ перспективны ряду точек звена A_0B_0, то есть в этом пучке плоскости «пробегают» точечный ряд A_0B_0 от положения $\sigma_0(A_0C_0)$ до $\eta_0(B_0C_0)$. Плоскости δ_j пучка δ проходят через базисную точку X^∞ и через точки пересечения противолежащих звеньев A_0C_0 и B_0C_0 вспомогательными гиперплоскостями уровня y = const. Двупараметрическое множество точек пересечения плоскостей пучков δ, ω образует поверхность, «натянутую» на контур $A_0B_0C_0$ в пространстве E^4, проекция которой на Γ(xyz) — искомая поверхность, а на Γ′(xyt) — отсек конической поверхности с вершиной C′ и направляющей A′B′ (см. рис. 8).

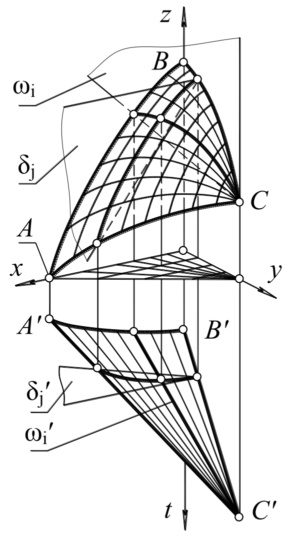


Рис. 8

Заключение. Рассмотрен графический способ построения поверхности, основанный на выходе в четырехмерное пространство, конструктивная реализация которого отличается применением гиперэпюра вместо плоского проекционного чертежа. Показано, что способ может быть использован для построения поверхности, проходящей не только через четырехзвенный, но и через трехзвенный замкнутый контур.

Библиографический список

1. Котов, И. И. Геометрические основы ключевых способов построения поверхностей : сб. научн. тр. / И. И. Котов // Труды Всесоюзного заочного энергетического института. — М. : МЭИ, 1957. — Вып. 10. — С. 15–36.

2. Волошинов, Д. В. Конструктивное геометрическое моделирование. Теория, практика, автоматизация: монография / Д. В. Волошинов. — Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2010. — 355 с.

3. Короткий, В. А. Компьютерное моделирование фигур четырехмерного пространства / В. А. Короткий // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 7. — С. 14–20.

4. Иванов, Г. С. Теоретические основы начертательной геометрии / Г. С. Иванов. — М. : Машиностроение, 1998. — 157 с.

КОРОТКИЙ Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры графики.
Адрес для переписки: ospolina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2014 г.

УДК 004.925.8:628.952

Н. В. РЕВЗИНА

Омский государственный институт сервиса

КОНСТРУИРОВАНИЕ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

В статье рассмотрен алгоритм математического моделирования рефлектора, кусочно-линейной геометрии, перераспределяющего энергию, исходящую от источника согласно производственной необходимости. Решение задачи в линейном виде позволяет применить полученные данные для конструирования поверхностей вращения, а также конструкций, имеющих вытянутую геометрию. Результаты исследования могут быть использованы при производстве узлов аппаратов для узкоспектральной полимеризации, использующихся в полиграфии и других областях промышленности.

Ключевые слова: аппарат отражения, рефлектор, интенсивность облучения, полимеризация.

Для перенаправления излучения, рассеивания или концентрации энергии применяются различные типы отражающих конструкций [1]. Геометрия отражателей зачастую является ключевым фактором производственного процесса, поэтому решение задачи построения рефлекторов, порождающих поток лучистой энергии согласно заданному закону, позволяет оптимизировать производственную деятельность во многих отраслях промышленности. Конструкторско-техническое решение обеспечивает оптимальное использование световой энергии при УФ-сушке продукции в типографиях, так как форма рефлектора определяет необходимую мощность УФ-лампы, а значит, экономичность и скорость изготовления продукции. Перераспределяя энергию на периферийные области, рефлектор позволяет не только обеспечить равномерное запекание, но и расширить область полезного действия устройства, предоставляя возможность увеличить формат продукции, при расходе того же количества ресурсов [2].

Рефлекторы, использующиеся в светонаправляющих конструкциях УФ-сушек, фокусируют энергию, находясь на малом расстоянии от источника облучения и от принимающей поверхности, чтобы распределить отраженное излучение наиболее равномерно, необходимы специальные конструкторские решения.

Основная проблема заключается в том, чтобы найти оптимальное положение источника *S*, а также положение и форму отражателя *L*, при которых создаваемая суммарная функция энергетической освещенности была бы достаточно равномерной. На практике такая задача может решаться различными способами, при разных вариантах компоновочных схем и геометрии рефлектора. Рассмотрим случай, когда длина облучаемой поверхности значительно больше размеров источника излучения, отражатель представляет кусочно-линейные отрезки, а функция энергетической освещенности задана постоянной. Пусть источник *S* точечный, приемник *t* линейный, а их расположение симметричное. Пусть заданная функция энергетической освещенности постоянная.

Очевидно, что постоянную функцию энергетической освещенности невозможно получить при помощи только одного отражающего элемента ($k=1$). Пусть $k=2$, то есть будем решать задачу при помощи двух отражающих линейных элементов L_1 и L_2. С учетом симметрии общее число отражающих элементов равно четырем. Расчетная схема приведена на рис. 1.

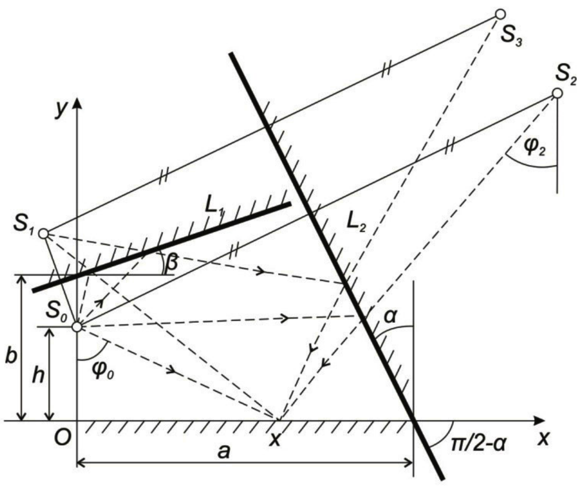


Рис. 1. Расчетная схема кусочно-линейного отражателя $\{L_1, L_2\}$

Прямая освещенность E_0 в точке *x* определяется выражением:

$$E_0 = \frac{I\cdot\cos\varphi_0}{r_0^{\,2}} = \frac{I\cdot h}{\left(x^2+h^2\right)^2}\cdot \qquad (1)$$

Уравнение линейного отражателя L_1 имеет вид

$$y = tg\beta\cdot x + b,\ 0 < \beta < \pi/2 \qquad (2)$$

Уравнение прямой S_0S_1

$$x_1 = (h-b)\cdot\sin 2\beta,\ y_1 = (h-b)\cdot\sin^2\beta + 2b - h \qquad (3)$$

Дополнительная освещенность E_1 будет создаваться отражением $S_0 \rightarrow L_2 \rightarrow t$,

$$E_1 = \frac{I\cdot\cos\varphi_1}{r_1^{\,2}}, \qquad (4)$$

где $r_1^2 = (x - x_1)^2 + y_1^2$, $\cos\varphi_1 = \dfrac{y_1}{r_1}$.

Уравнение линейного отражателя L_2 имеет вид

$$y = -tg(\frac{\pi}{2} - \alpha)\cdot(x - a),\ 0 < \alpha < \pi \quad (5)$$

Уравнение прямой S_0S_2

$$y = tg\alpha \cdot x + h \quad (6)$$

После несложных преобразований получаем координаты мнимого источника S_2:

$$x_2 = 2a\cdot\cos^2\alpha - h\cdot\sin 2\alpha,$$

$$y_2 = a\cdot\sin 2\alpha + 2h\cdot\cos^2\alpha - h. \quad (7)$$

Дополнительная освещенность E_2 будет создаваться отражением $S_0 \rightarrow L_2 \rightarrow t$

$$E_2 = \frac{I\cdot\cos\varphi_2}{r_2^2}, \quad (8)$$

где $r_2^2 = (x_2 - x)^2 + y_2^2$, $\cos\varphi_2$

Полная освещенность в точке x будет

$$E = E_0 + E_1 + E_2 \quad (9)$$

Следующая задача заключается в том, чтобы при заданных значениях a подобрать параметры h, b, α, β так, чтобы функция суммарной освещенности $E=E(x)$ имела минимальные отклонения от постоянной функции $E_n=const$. При этом значение E_n пока не известно.

Необходимо учесть освещенность E_3, создаваемую двойным отражателем $S_0 \rightarrow L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow t$.

Уравнение линейного отражателя L_3 можно записать в виде.

$$tg(\frac{\pi}{2} - \alpha)\cdot x + y - a\cdot tg(\frac{\pi}{2} - \alpha) = 0. \quad (10)$$

Тогда координаты мнимого источника S_3 будут

$$x_3 = \frac{\left[1 - tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right]\cdot x_1 - 2\cdot tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\cdot y_1 + 2a\cdot tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 1}, \quad (11)$$

$$y_3 = \frac{\left[tg^2\left(\frac{\pi}{2} - 1\right)\right]\cdot y_1 - 2\cdot tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\cdot x_1 + 2a\cdot tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 1} \quad (12)$$

или, после упрощений,

$$x_3 = x_1 + 2(a - x_1)\cdot\cos^2\alpha - y_1\cdot\sin 2\alpha,$$

$$y_3 = y_1\cdot\cos 2\alpha + (a - x_1)\cdot\sin 2\alpha. \quad (13)$$

Дополнительная освещенность в точке x будет

$$E_3 = \frac{I\cdot\cos\varphi_3}{r_3^2}, \quad (14)$$

где $r_3^2 = (x_3 - x)^2 + y_3^2, \cos\varphi_3 = \dfrac{y_3}{r_3}$.

Полная освещенность в точке x будет

$$E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3. \quad (15)$$

Ограничим длину отражательного элемента L_2 условием, чтобы все отраженные лучи попадали на отрезок [o, a]. Поэтому верхняя граница элемента L_2 определяется как точка пересечения двух прямых: прямой L_2 и прямой OS_2.

То есть

$$\begin{cases} tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\cdot x + y - a\cdot tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = 0 \\ \dfrac{x}{2a\cdot\cos^2\alpha - h\cdot\sin 2\alpha} = \dfrac{y}{a\cdot\sin 2\alpha + 2h\cdot\cos^2\alpha - h} \end{cases}. \quad (16)$$

Отсюда следует, что верхняя граница отражательного элемента L_2 описывает кривую, которую можно записать в параметрической форме.

$$x = \frac{a^2\cdot\cos^3\alpha - ah\cdot\sin\alpha\cdot\cos^2\alpha}{a\cdot\cos\alpha - \frac{h}{2}\cdot\sin\alpha},$$

$$y = \frac{a^2\cdot\cos^3\alpha\cdot\sin\alpha - a\cdot\frac{h}{2}\cdot\cos\alpha\cdot\cos 2\alpha}{a\cdot\cos\alpha - \frac{h}{2}\cdot\sin\alpha}. \quad (17)$$

Полученные данные обеспечивают перераспределение энергии, позволяющее расширить область полезного действия устройства, компенсировав неравномерность интенсивности облучения поверхности. Технический эффект достигается за счет использования системы линейных зеркальных рефлекторов, расположенных таким образом, чтобы отраженные лучи скапливались на периферийных участках запечатываемого объекта. Зеркальные поверхности имеют максимально возможный коэффициент отражения, а линейный вид обеспечивает простоту производства и сводит к минимуму погрешность геометрии. Решение задачи в линейном варианте является основой для конструирования объемных аппаратов отражения, выполненных в виде поверхностей вращения или имеющих вытянутую геометрию.

Библиографический список

1. Гуторов, М. М. Основы светотехники и источники света : учеб. пособие для вузов / М. М. Гуторов. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — С. 4—6.

2. Толивер-Нигро, Х. Технологии печати : учеб. пособие для вузов / Х. Толивер-Нигро ; пер. с англ. Н. Романова. — М. : Принт-медиа центр, 2006. — 73 с.

РЕВЗИНА Наталия Владимировна, аспирантка кафедры «Конструирование и технологии изделий лёгкой промышленности».

Адрес для переписки: NRevzina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2014 г.

УДК 629.76

В. В. ШАЛАЙ
В. И. ТРУШЛЯКОВ
В. Ю. КУДЕНЦОВ

Омский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПЕРИОДА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГАЗИФИКАЦИИ ЖИДКИХ ОСТАТКОВ ТОПЛИВА

Проведено моделирование взаимодействия жидких остатков компонентов ракетного топлива с газовым потоком вводимого теплоносителя для начального периода функционирования системы газификации. Определены режимы деформирования и распада каплевидных жидких остатков топлива в объеме топливного бака. На основе результатов моделирования предложена гипотеза о динамическом процессе начального этапа газификации. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: топливные баки, моделирование, двухфазное течение, ракетное топливо, газификация.

В настоящее время для решения проблемы снижения техногенного воздействия космических средств выведения на окружающую среду предлагается использовать подходы на основе технологии низкотемпературной газификации жидких остатков компонентов ракетного топлива (КРТ) в топливных баках ракетных блоков [1, 2].

В соответствии с концепцией предлагаемого подхода предлагается рассмотреть различные направления использования жидких остатков КРТ: от их газификации и выброса в окружающее пространство до использования энергетического ресурса, заключенного в них с целью создания и реализации заданного по величине и направлению импульса тяги.

Постановка задачи. Одной из основных сложностей при составлении модели описания термодинамического процесса низкотемпературной газификации является то, что процесс протекает в условиях малых гравитационных полей (n_x=0,001÷0,2), при нарушении сплошности газожидкостной смеси и неопределённости граничного и фазового состояния.

При этом, значение перегрузки n_x=0,001÷0,01 соответствует начальному периоду работы системы газификации, перегрузка n_x=0,15÷0,2 при работе ракетного двигателя, функционирующего по схеме «газ—газ» или сбросе продуктов газификации через управляющие сопла [3].

Теоретико-экспериментальные исследования, приведенные в работе [4], позволили сформулировать гипотезу о первоначальном расположении жидких остатков КРТ в объеме топливного бака на начало процесса низкотемпературной газификации. Согласно данной гипотезе, остатки жидкого КРТ с различным диаметром капель (от 2 до 5 мм) равномерно распределены в объеме топливной емкости.

Газификация жидких остатков КРТ осуществляется горячим газогенераторным газом, вводимым в объем топливного бака. При этом истекающая струя теплоносителя (ТН) встречается с распределёнными по объёму каплями топлива.

Целью данного исследования является проведение моделирования взаимодействия жидких капель КРТ с газовым потоком вводимого ТН.

При численном моделировании принимались следующие допущения:

1) жидкие остатки КРТ, на начало процесса низкотемпературной газификации, равномерно распределены в объеме емкости;

2) работа системы низкотемпературной газификации осуществляется при дозвуковой скорости вводимого ТН в объём ёмкости;

3) состав газовой фазы не изменяется;

4) процесс протекает без теплообмена и химического взаимодействия между вводимым ТН и жидким остатком КРТ.

Математическая модель и расчётные зависимости. Для технического моделирования двухфазных течений в объёме топливного бака применим метод, базирующийся на основе численного решения уравнений Навье—Стокса, осредненных по Рейнольдсу.

В уравнениях объемные доли фаз должны удовлетворять соотношению

$$\sum_{q=f}^{s} \alpha_q = 1, \tag{1}$$

где индекс $q=f$ относится для непрерывной фазы, $q=s$ — для дисперсной фазы.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q u_q\right) = 0. \tag{2}$$

Уравнение изменения количества движения

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q u_q\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q u_q u_q\right) = -\alpha_q \nabla p' + \tag{3}$$
$$+ \alpha_g \rho_g g + \nabla \cdot \left(\alpha_q \mu_{eff} \left(\nabla u_q + (\nabla u)^T\right)\right) + M_m,$$

где p_q — плотность; u_q — осредненное значение скорости; g — ускорение силы тяжести; $\mu_{eff}=(\mu+\mu_t)$ — коэффициент эффективной вязкости; μ — коэффициент динамической молекулярной вязкости; μ_t — коэффициент турбулентной вязкости; M_m — передача межфазного импульса; p' — измененное давление.

Давление p' определяется $p' = p + \frac{2}{3}\rho k + \frac{2}{3}\mu_{eff} u$, где p — давление в объеме емкости.

В дополнение к уравнениям (2)–(3) используется двухпараметрическая k-ε модель турбулентности [5]. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации записываются для газовой фазы. Дополнительные члены уравнений учитывают эффект взаимодействия дисперсной жидкостной фазы. Уравнения для турбулентности записываются в виде:

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f k)}{\partial t} + \nabla(\alpha_f \rho_f u_f k) = \nabla\left(\alpha_f\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + \alpha_f(G_k - \rho_f \varepsilon) + S_f^k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\alpha_f \rho_f u_f \varepsilon) = \nabla\left(\alpha_f\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right) + \alpha_f \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1} G_k - C_{\varepsilon 2}\rho_f \varepsilon) + S_f^\varepsilon, \quad (5)$$

где k — турбулентная кинетическая энергия; ε — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; S_f^k, S_f^ε — дополнительные члены, учитывающие межфазное взаимодействие, которое моделируется.

Здесь $G_k = \mu_t \nabla u(\nabla u + \nabla u^T) - \frac{2}{3}\nabla u(\mu_t \nabla u + \rho k)$.

Турбулентная вязкость вычисляется по формуле Колмогорова–Прандтля $\mu_t=\rho C_\mu k^2/\varepsilon$. В уравнениях (4)–(5) модельные константы $C_{1\varepsilon}=1{,}44$; $C_{2\varepsilon}=1{,}92$; $C_\mu=0{,}09$; $\sigma_k=1{,}0$; $\sigma_\varepsilon=1{,}3$.

Передача межфазного импульса должна удовлетворять условию $M_f=-M_s$.

Межфазная передача импульса записывается:

$$M_s = F_D + F_{VM} + F_L + F_{TD}, \quad (6)$$

где F_D, F_{VM}, F_L, F_{TD} — соответственно сила лобового сопротивления, виртуальная массовая сила, подъёмная сила, сила межфазной дисперсионной турбулентности.

Сила лобового сопротивления (Drag forse) определяется:

$$F_D = \frac{3}{4}\frac{\alpha_s}{d_s}\rho_f C_D |u_f - u_s|(u_f - u_s), \quad (7)$$

где C_D — коэффициент лобового сопротивления. В расчетах принимается модель Schiller Naumann, для которой коэффициент C_D определяется:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_s}\left(1 + 0{,}15\, Re^{0{,}687}\right) & Re \le 10^3 \\ 0{,}44 & 10^3 \le Re \le (1 \div 2)10^5. \end{cases} \quad (8)$$

Число Рейнольдса $Re = \frac{\rho_f |u_f - u_s| d_s}{\mu_f}$.

Виртуальная массовая сила (Virtual mass force) определяется по зависимости:

$$F_{VM} = C_{VM}\alpha_s \rho_f \frac{d(u_f - u_s)}{dt}, \quad (9)$$

где C_{VM} коэффициент виртуальной массовой силы. Согласно [6] для малой концентрации жидкой фазы $\alpha_s \to 0$, коэффициент $C_{VM} \to 0{,}5$. Принимаем для дальнейших расчетов $C_{VM}=0{,}5$.

Подъёмная сила (Lift force) определяется по зависимости:

$$F_L = C_L \alpha_s \rho_f (u_f - u_s) \times (\nabla \times u_s), \quad (10)$$

где C_L — безразмерный коэффициент. При моделировании процесса принимается модель Tomiyama [7], при которой коэффициент C_L определяется по следующим зависимостям:

$$C_L = \begin{cases} min(0{,}288\, tanh(0{,}121\, Re_s, f(Eo'))) & Eo' \le 4 \\ f(Eo') & 4 < Eo' \le 10, \\ -0{,}27 & 10 < Eo' \end{cases} \quad (11)$$

где $f(Eo') = 0{,}00105 Eo'^3 - 0{,}0159 Eo'^2 - 0{,}0204 Eo' + 0{,}474$. Eo' — модифицированное число Этвеша, которое определяется:

$$Eo' = \frac{g(\rho_s - \rho_f) d_H^2}{\sigma}. \quad (12)$$

В формуле параметр d_H определяет диаметр капли жидкости с учетом ее деформации:

$$d_H^2 = d_s\left(1 + 0{,}163 Eo^{0{,}757}\right)^{1/3}. \quad (13)$$

Входящее в зависимость (13) число Этвеша определяется:

$$Eo = \frac{g(\rho_s - \rho_f) d_s^2}{\sigma}, \quad (14)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Сила межфазной дисперсионной турбулентности (Interphase turbulent dispersion force) определяется по модели Lopez de Bertodano [8]:

$$F_{TD} = -C_{TD}\rho_f k \nabla \alpha_f. \quad (15)$$

В зависимости (15) коэффициент C_{TD} лежит в диапазоне от 0,1 до 0,5.

Проведем оценку режима деформирования и распада каплевидных жидких остатков КРТ в объеме топливного бака при взаимодействии с вводимой струей ТН.

Одним из основных параметров, влияющих на механизм деформирования и распада маловязких жидкостей, оказывает влияние число Вебера. Необходимо отметить, что, согласно исследованиям [9], законченная модель аэродинамического дробления капель до настоящего времени не создана.

Существует несколько классификаций режимов дробления капель. В данном исследовании примем модель [10] Согласно данной классификации, режимы разрушения жидких капель определяются критическими числами Вебера:

1) вибрационное дробление (Vibrational breakup) We<12;

2) дробление по типу «парашют» (Bag breakup) 12<We<50;

3) дробление по типу «парашют» со струйкой (Bag-and-stamen breakup) 50<We<100;

4) срыв микрокапель жидкости с экватора капли (Sheet stripping) 100<We<350;

5) катастрофическое дробление (Catastrophic breakup) We>350.

Число Вебера, для модели неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, определяется:

$$We = \frac{\rho_f (u_f - u_s)^2 d_s}{\sigma}. \quad (16)$$

Эволюция распада капель жидкого КРТ определяется по модели Reitz and Divakar [10].

Изменение радиуса капли жидкого КРТ в потоке газовой фазы определяется

$$\frac{dr_s}{dt} = \frac{-(r_s - r_{stable})}{t_{br}}, \quad (17)$$

где r_{stable} — стабилизированный радиус частиц капли жидкого КРТ после распада, t_{br} — время распада капли жидкого КРТ.

Для условия $We > We_{crit}$, где критическое число Вебера $We_{crit} = 6$, время распада капли жидкого КРТ определяется

$$t_{br} = \pi \sqrt{\frac{\rho_s r_s^3}{2\sigma}}. \quad (18)$$

Стабилизированный радиус частиц капли жидкого КРТ после распада определяется

$$r_{stable} = \frac{6\sigma}{\rho_f (u_f - u_s)^2}. \quad (19)$$

Для условия $We/\sqrt{Re} > 0{,}5$ $We/\sqrt{Re} > 0{,}5$ время распада капли жидкого КРТ определяется

$$t_{br} = 20 \frac{r_s}{(u_f - u_s)} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_f}}. \quad (20)$$

Стабилизированный радиус частиц капли жидкого КРТ после распада определяется

$$r_{stable} = \frac{\sigma^2}{2\rho_f^2 (u_f - u_s)^3 \nu}. \quad (21)$$

Параметры процесса:

1) непрерывная фаза — газовая фаза, состоящая из ТН, подаваемого в объём ёмкости, газифицированного КРТ и газа наддува, находящегося в топливном баке на начало процесса газификации, $T_{тн0} = 1200°K$;

2) состав газовой фазы: 75 % — газ наддува (гелий), 20 % — газообразный КРТ, 5 % — вводимый ТН;

3) коэффициент динамической вязкости газовой фазы — $\mu_0 = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

4) дисперсная фаза — жидкий остаток КРТ, $T_{крт0} = 280°K$;

5) скорость ввода ТН в топливный бак — $u_{тн0} = 500$ м/с;

6) давление в топливном баке — $p_0 = 3$ атм;

7) плотность газовой фазы — $\rho_f = 0{,}56$ кг/м³.

8) ускорение силы тяжести — 0,15 м/с² ($n_x = 0{,}15$);

9) характерный размер частиц дисперсной фазы — 3 мм;

10) объемная доля сплошной фазы — 97,5 (97,5 %);

11) объемная доля дисперсной фазы — 0,025 (2,5 %);

12) модель турбулентности *k-ε*.

В качестве жидких остатков КРТ рассматривались: азотный тетраксид (АТ), несимметричный диметилгидразин (НДМГ), керосин. Физические параметры для данных топлив, согласно [11], следующие: АТ ($\rho = 1520$ кг/м³, $\sigma = 0{,}0275$ Н/м), НДМГ ($\rho = 786$ кг/м³, $\sigma = 0{,}028$ Н/м), керосин ($\rho = 820$ кг/м³, $\sigma = 0{,}0289$ Н/м).

На поверхностях топливного бака ставилось граничное условие непроницаемой, твёрдой стенки. Скорость на стенке равнялась нулю ($u_{тн|h} = 0 = 0$).

Результаты и обсуждение. Численное моделирование двухфазного течения проводилось в программном комплексе «ANSYS CFX» на примере следующих типовых конструкций топливных ёмкостей:

— баки первых ступеней выполнены в виде цилиндрических баков со сферическими формами днищ, боковая поверхность — имеет силовой набор, днища выполнены в виде гладких оболочек;

— баки последующих ступеней выполнены в виде цилиндрических баков со сферическими формами днищ, боковая поверхность и днища — выполнены в виде гладких оболочек.

Расчётная область сетки состояла от 450 до 860 тыс. ячеек.

На рис. 1 приведены картины скорости движения капель жидкого КРТ в газовой фазе топливного бака первой и второй ступени для различных плоскостей симметрии.

На рис. 2 приведены графики изменения относительной скорости обтекания ТН капли жидкого

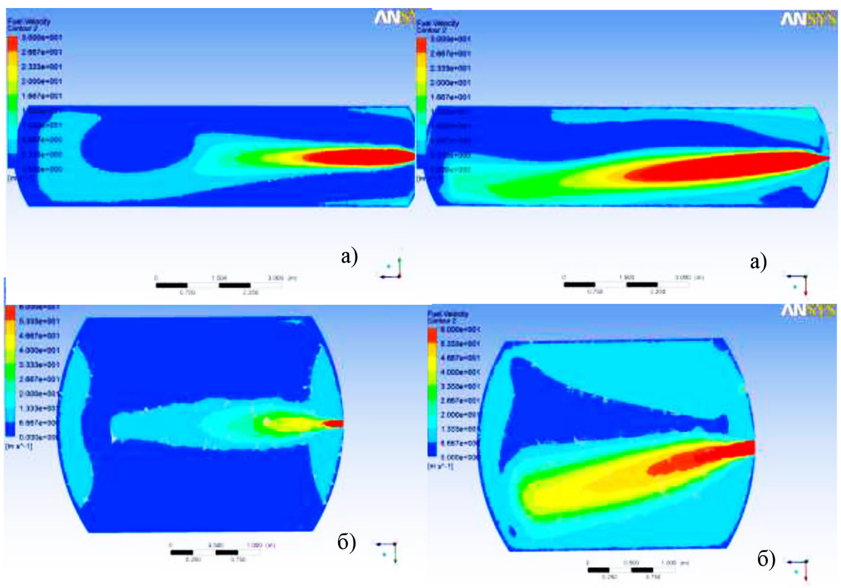
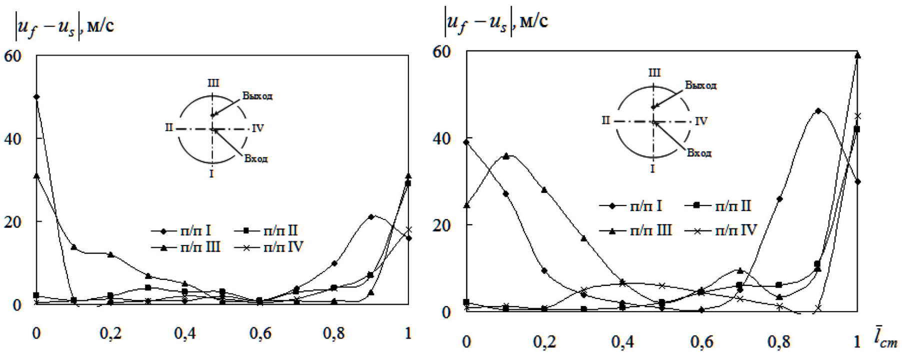


Рис. 1. Картины скорости движения капель жидкого КРТ в газовой фазе топливного бака первой (а) и второй (б) ступени для различных плоскостей симметрии



а) б)

Рис. 2. Графики изменения относительной скорости обтекания ТН капли жидкого КРТ в пристеночной области топливного бака первой (а) и второй (б) ступени для различных плоскостей симметрии

КРТ в пристеночной области топливного бака первой и второй ступени для различных плоскостей симметрии.

Анализ моделирования взаимодействия газового потока с жидкими остатками КРТ при проведении процесса газификации внутри типовых конструкций топливных баков показал:

1. В зоне вввода ТН в объем топливного бака образуется область, имеющая факелообразную форму, в которой наблюдается значительное изменение скорости движения жидкой фазы и самого ТН. При этом скорость движения ТН изменяется от первоначального значения скорости вввода ТН $u_{тн0}$ до величины $(0{,}02\div0{,}04)u_{тн0}$. Длина факелообразной области составляет: для бака первой ступени — 0,5÷0,65 длины топливного бака, ширина — 0,35÷0,4 диаметра топливного бака; для бака второй ступени факелообразная зона простирается почти по всей длине топливного бака, имея ширину около 0,3÷0,35 диаметра топливного бака. В данной области число Вебера достигает значения We=80÷230, что соответствует 3 и 4 режиму дробления капли. В этой зоне время распада капли жидкого КРТ составляет $t_{br}=0{,}018\div0{,}03$ с., стабильный диаметр частиц образующихся после распада капли составляет 230÷480 мкм.

2. Учитывая высокую температуру вводимого ТН, наряду с диспергированием капли, наблюдается испарение образующихся частиц после распада капли.

3. В пристеночной области топливного бака (h=10 см от стенки) в плоскости I–III наблюдается увеличение скорости движения двухфазного потока, в плоскости II–IV — увеличение скорости потока наблюдается только у днищ. В данных областях число Вебера достигает значения We=10÷13, что соответствует режимам 1 и 2. В остальной части бака число Ведера We=1,3÷2, что меньше критического значения.

4. Непосредственно в пристеночной области топливного (h<5 см от стенки) скорость двухфазного потока резко снижается. Отмечается, что наличие силового набора способствует снижению скорости. В этой области, за счет действия сил поверхностного натяжения, наблюдается образование жидкой пленки на внутренней поверхности топливного бака.

5. При высокой скорости движения двухфазного потока в объеме емкости происходит увлекание слабодеформируемых капель в поток из области с низким течением и, затем, направление данного потока через факелообразную зону, где происходит диспергирование капель жидкости.

6. Динамическое моделирование показало, что через 10÷14 с после начала процесса газификации состояние газожидкостной фазы выходит на стационарный режим, при котором жидкие остатки КРТ распределены по внутренней поверхности топливной емкости. С внешней границы жидкости, распределенной по внутренней поверхности топливного бака, происходит «сдир» небольших капель, доля которых менее 5 % от распределенных остатков топлива.

Заключение. Численное моделирование газожидкостных потоков внутри типовых конструкций топливных баков ракет при проведении процесса газификации жидких остатков КРТ для начального периода функционирования системы позволило определить параметры характерных областей течений, провести оценку поведения каплевидных жидких остатков КРТ в объеме топливного бака при взаимодействии с вводимой струей ТН и определить параметры процесса.

На основе результатов моделирования предложена гипотеза о динамическом процессе начального этапа газификации.

Полученные результаты теоретического исследования рекомендуются к использованию для расчёта параметров процесса газификации жидких остатков КРТ в топливных баках ракет.

Библиографический список

1. Наукоёмкие технологии в технике: энциклопедия / А. Н. Котов [и др.] ; под общ. ред. А. Н. Котова. — М. : ЗАО «НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2010. — Т. 28. — 383 с.

2. Куденцов, В. Ю. Разработка бортовой системы снижения техногенного воздействия космических средств выведения на окружающую среду // В. Ю. Куденцов, В. И. Трушляков // Космонавтика и ракетостроение. — 2010. — № 3 (60). — С. 181–188.

3. Трушляков, В. И. Газификация жидких остатков ракетного топлива в условиях малой гравитации // В. И. Трушляков, В. Ю. Куденцов // Полёт. — 2011. — № 3. — С. 33–40.

4. Трушляков, В. И. Снижение техногенного воздействия ракетных средств выведения на жидких токсичных компонентах ракетного топлива на окружающую среду : моногр. / В. И. Трушляков, В. В. Шалай, Я. Т. Шатров ; под ред. В. И. Трушлякова. — Омск : ОмГТУ, 2004. — 220 с.

5. Pourahmadi, F. Modelling solid-fluid turbulent flows with application to predicting erosive wear / F. Pourahmadi, J. A. C. Humpherey // PhysicoChemical Hydrodynamics. — 1983. — Vol. 4. — № 3. — Pp. 191–219.

6. Wijngaarden, L. Van Hydrodynamic interaction between gas bubbles in liquid / L. Van Wijngaarden, D. J. Jeffrey // Journal of Fluid Mechanics. — 1976. — Vol. 77. — № 1. — Pp. 27—44.

7. Tomiyama, A. Struggle with Computational Bubble Dynamics, Third Int. Conf. On Multiphase Flow, ICMF'98, Lyon, France, June 8—12. — 1998. — Pp. 1—18.

8. Lopez de Bertodano, M. Phase Distribution in Bubbly Two-Phase Flow in Vertical Ducts / M. Lopez de Bertodano, R. T. Lahey Jr, O. C. Jones // International Journal of Multiphase Flow. — 1994. — Vol. 20. — № 5. — Pp. 805—818.

9. Gelfand, B. E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag / B. E. Gelfand // Prog. Energy Combust. Sci., 1996. — Vol. 22. — Pp. 201—265.

10. Reitz, R. and Diwakar, R., Structure of High-Pressure Fuel Sprays, SAE Technical Paper 870598, 1987.

11. Химмотология ракетных и реактивных топлив / А. А. Братков [и др.] ; под ред. А. А. Браткова. — М. : Химия, 1987. — 304 с.

ШАЛАЙ Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело», ректор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.
ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры авиа- и ракетостроения.
КУДЕНЦОВ Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры авиа- и ракетостроения.
Адрес для переписки: e-mail: kvu_om@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.12.2014 г.

УДК 621.74:669.15

В. В. АКИМОВ
П. В. ПЕТУНИН
И. А. КЛИШЕВ
А. В. КУЗНЕЦОВ

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск

Омский автобронетанковый инженерный институт

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТАЛИ Р6М5

Изучены структура и свойства опытных сталей после различных режимов термической обработки. Показано, что стойкость литых опытных штампованных вставок из стали Р6М5 превосходит стойкость аналогично из проката стали Р6М5. Коме того, установлено, что пониженная прочность и недостаточная ударная вязкость и пластичность не позволяют данную сталь использовать для производства штампованного инструмента. Перечисленные особенности и недостатки в целом определяют направление исследований по сохранению достоинств литой стали Р6М5 и устранению их недостатков.

Ключевые слова: микроструктура стали, закалка, отпуск, отжиг, свойства стали.

Введение. Установлено, что наличие в структуре литой стали ледебуритной эвтектики повышает сопротивление инструмента абразивному износу в сочетании с высоким контактным давлением в сравнении с кованым инструментом [1, 2].

Однако пониженная прочность до 1200 МПа и недостаточная ударная вязкость не позволяют успешно использовать эту сталь для производства штампового и режущего инструмента. Перечисленные особенности и определяют направление исследований по сохранению достоинств литой быстрорежущей стали и устранению ее недостатков. При этом основное внимание уделяется получению плотной отливки с достаточно мелким первичным зерном и раздроблению карбидов в эвтектике. Эти цели предлагается достичь за счет электрошлакового литья и модифицирования.

Результаты исследования. Основные свойства стали формируются при окончательной термической обработке, обеспечивающей высокую вторичную твердость, прочность, а также достаточную ударную вязкость (табл. 1) [3, 4].

Из анализа приведенных результатов табл. 1 можно сделать следующие выводы:

1. Твердость модифицированных и немодифицированных сталей Р6М5 поле окончательной термической обработки находилось в пределах (65...67) HRC.

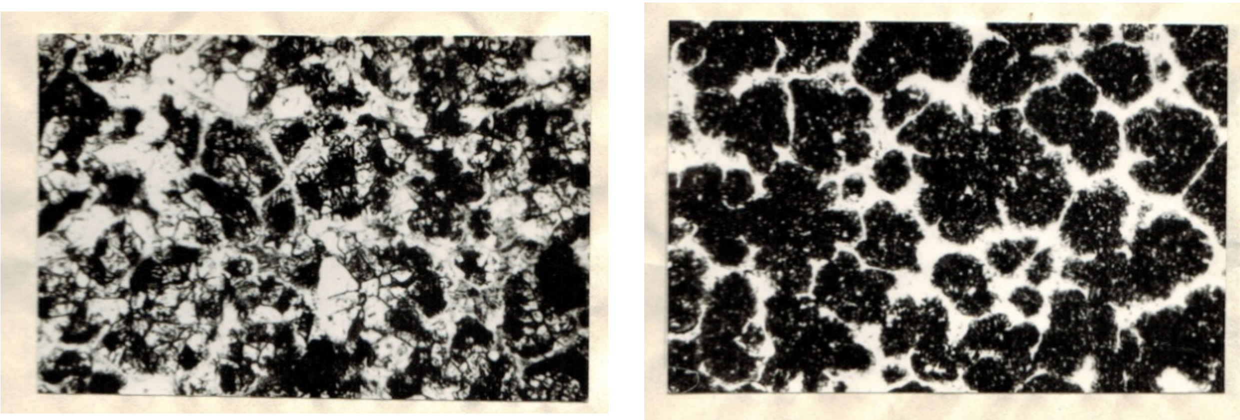
2. Повышение теплостойкости на 2—3 ед. HRC произошло в стали Р6М5 модифицированной карбонитридом титана и нитридом циркония совместно с феррованадием.

3. Максимальное значение прочности имела сталь Р6М5, модифицированная карбонитридом титана в количестве 0,04 %.

Таблица 1

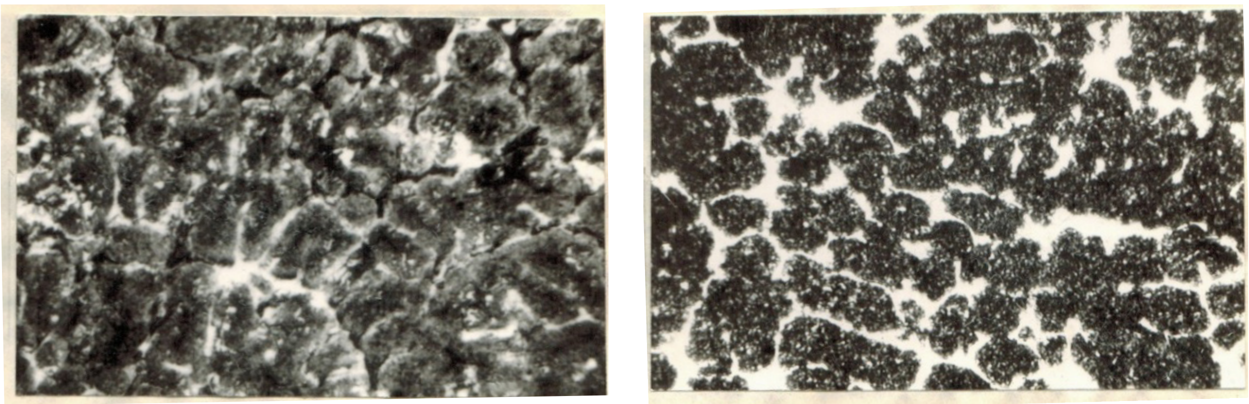
Свойства опытных сталей после термической обработки

Свойства стали	HRC	Теплостойкость 600 ^{0}С	Стрела прибора, мм	σ изг, МПА
Р6М5 Контрольная	65,5–66,5	57,0–58,0	2,38	1480
Р6М5+Z$_2$N-0,1% M$_0$-0,15% TiCN-0,04%	66,0	58,0	2,11	1072
Р6М5+W-0,1% TiCN-0,15%	65,5–66,5	57,0–58,0	2,52	1642
Р6М5+V-0,1% TiCN-0,15%	67,0	57,5–58,0	2,70	1430



а) б)

Рис. 1. Микроструктура стали Р6М5: а — литое состояние х-450, б — отожженное состояние х-450



а) б)

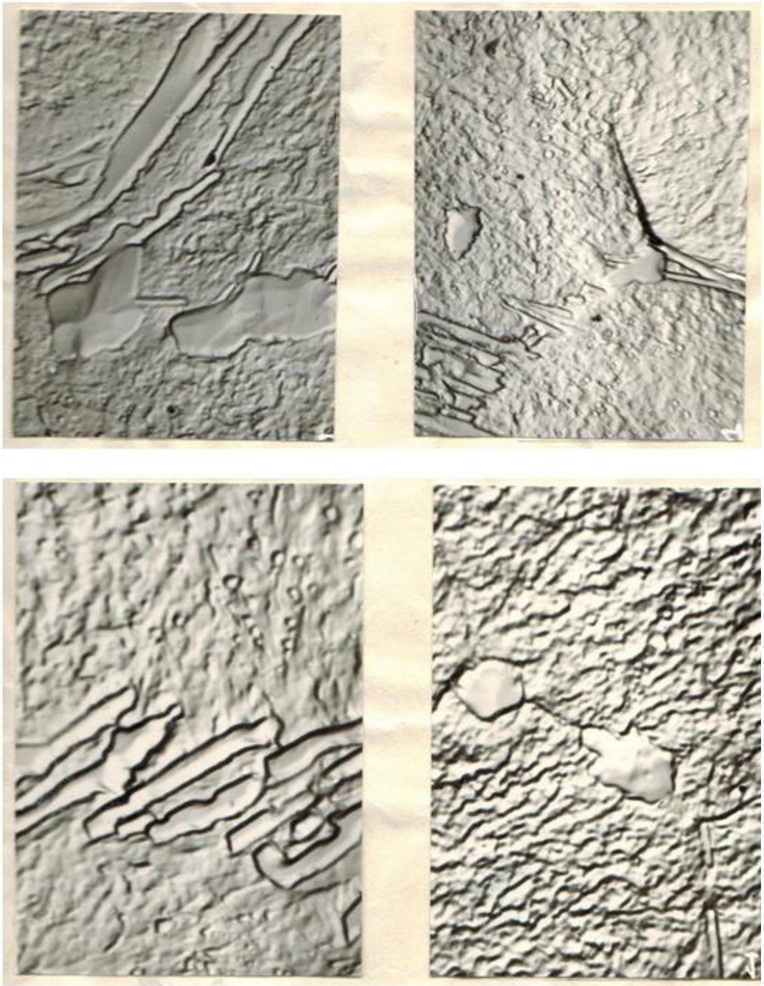
Рис. 2. Микроструктура стали Р6М5: а — литое состояние х-450, б — отожженное состояние х-450

Обсуждение результатов. Проведенные исследования микроструктуры по оценке влияния модификаторов показали качественные и количественные изменения в характере строения первичного зерна стали, а также морфологического типа эвтектики. Заметное уменьшение, примерно в 1,2...1,4 раза, первичного зерна произошло в стали Р6М5, модифицированной карбонитридом титана (рис. 1).

В меньшей степени проявляется эффект измельчения первичного зерна при модифицировании нитридом циркония (рис. 2).

Анализ микроструктур стали Р6М5 всех плавок показал, что введение модификатора приводит к уменьшению общего количества ледебуритной эвтектики, измельчению и утончению эвтектических карбидов в междендритных областях и более равномерному распределению по сечению слитка. В отожженном состоянии (рис. 1б, рис. 2б) структура представляет собой зернистый перлит, ледебуритную эвтектику и карбиды.

Действие модификатора влияет как на процесс формирования дендритного основного зерна, так и



а)

б)

Рис. 3. Микроструктура стали Р6М5: а — литое состояние без модификаторов х-15000, б — литое состояние с модификатором х-15000

на кристаллизацию эвтектики. Модифицирование ультрадисперсными частицами карбонитрида титана и дисперсными частицами нитрида циркония формируют стержневой и пластинчатый тип эвтектики (рис. 3), что подтверждается проведенными исследованиями на растровом микроскопе.

Детальное изучение ледебуритной эвтектики в литом состоянии при больших увеличениях (рис. 3) показало, что в немодифицированной стали составляющие эвтектики имеют более угловатую форму и острые окончания. Лучшим режимом термической обработки является закалка с изотермической выдержкой при температуре 280 ^{0}С с получением бейнитной структуры [5, 6].

Заключение. Таким образом, изучены структуры и свойства опытных сталей после различных режимов термической обработки. На основании стойкостных испытаний установлено, что удовлетворительной стойкостью обладают изделия, прошедшие изотермическую закалку на структуру нижний бейнит. Кроме того, повышение механических свойств может быть достигнуто за счет морфологического типа ледебуритной эвтектики величины первичного зерна, а также равномерного распределения структурных составляющих по всему объему отливки. Использование литых штампованных вставок из быстрорежущей стали является перспективным направлением как с точки зрения повышения стойкости, так и экономии дефицитной быстрорежущей стали Р6М5.

Библиографический список

1. Бабаскин, Ю. В. Структура и свойства литой стали / Ю. В. Бабаскин. — Киев : Наук. Думка, 1980. — 240 с.
2. Акимов, В. В. Повышение свойств быстрорежущей стали для режущего инструмента / В. В. Акимов, П. В. Петунин, О. Ю. Бургунова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 2 (130). — С. 27—30.
3. Петунин, П. В. Разработка технологии получения режущего инструмента из литых заготовок быстрорежущей стали / П. В. Петунин, А. М. Селищев, Я. В. Алтухов, В. В. Акимов // Вестник СибАДИ. — 2013. — №3 (31). — С. 7—11.
4. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. — Новосибирск : Сиб. изд. филиала РАН, 1995. — 344с.
5. Петунин, П. В. Субструктурные изменения в процессе деформационного упрочнения / П. В. Петунин, А. М. Селищев, Р. Б. Баязитов, В. В. Акимов // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. — Омск. — 2013. — № 19. — С. 144—151.
6. Корзунин, Ю. К. Разрешение проблемы пониженной теплостойкости и разнозернистости быстрорежущей стали для режущего инструмента / Ю. К. Корзунин, Е. Н. Меркушев, В. П. Расщупкин, О. Ю. Бургонова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 2 (100). — С. 26—30.

АКИМОВ Валерий Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры

автомобилей, конструкционных материалов и технологий Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ).
ПЕТУНИН Павел Владимирович, преподаватель кафедры эксплуатации автомобилей и бронетанковой техники Омского автобронетанкового инженерного института.
КЛИШЕВ Иван Александрович, магистрант гр. НТКм-14Т2 факультета автомобильного транспорта СибАДИ.
КУЗНЕЦОВ Александр Викторович, инженер кафедры автомобилей, конструкционных материалов и технологий СибАДИ.
Адрес для переписки: 644080, г. Омск, пр. Мира 5, кафедра автомобилей, конструкционных материалов и технологий СибАДИ.

Статья поступила в редакцию 24.11.2014 г.

УДК 621.01

П. Д. БАЛАКИН
Ю. А. БУРЬЯН

Омский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ МАСС И ИСПЫТАНИЯ НА ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Разработана и приведена гамма дифференциальных уравнений, моделирующих движение платформы испытательного стенда в частных случаях комбинаций параметрических свойств платформы и внешнего силового возбуждения.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, диссипация, характер внешнего силового возбуждения.

В [1] и [2] нами предложена схема универсального стенда для экспериментального определения геометрии масс и испытаний на виброустойчивость сложных реальных техногенных объектов. Установочная платформа стенда совершает регулируемые движения, создаваемые внешним источником, способным генерировать различный характер силовой функции. Это обстоятельство влияет на форму дифференциальных уравнений движения платформы.

Составим дифференциальное уравнение движения платформы и приведем его решение применительно к бездемпферной механической системе, у которой внешнее силовое возбуждение представлено гармонической функцией вида $M(t)=M_0\sin pt$, где p — частота внешнего силового возбуждения. Уравнение углового движения платформы будет таким:

$$\ddot{\varphi} + k^2\varphi = \frac{M_0}{J}\sin pt\,. \tag{1}$$

При $p\neq k$ уравнение (1) имеет решение, состоящее из четырех слагаемых [3]:

$$\varphi = \varphi_0\cos kt + \frac{\dot{\varphi}_0}{k_1}\sin kt - \\ -\frac{M_0 p}{Jk(k^2-p^2)}\sin kt + \frac{M_0}{J(k^2-p^2)}\sin pt\,. \tag{2}$$

Первые два слагаемых описывают свободные колебания с начальной фазой φ_0 и начальной скорость $\dot{\varphi}_0$. При нулевых начальных условиях $t=0$, $\varphi_0=0$, $\dot{\varphi}_0=0$ эти слагаемые отсутствуют.

Третье слагаемое описывает гармонические колебания, происходящие с частотой k свободных колебаний, но с амплитудой, зависимой от возмущающего момента, эти колебания называют сопровождающими, и они накладываются на вынужденные колебания.

Четвертое слагаемое описывает вынужденные колебания с частотой изменения внешней силы p и амплитудой:

$$\varphi = \frac{M_0}{J(k^2-p^2)}\,. \tag{3}$$

При $p<k$ фаза вынужденных колебаний совпадает с фазой pt возмущающей силы, но при $p>k$ четвертое слагаемое в (2) получит вид:

$$\varphi = \frac{M_0}{J(k^2-p^2)}\sin(pt+\pi), \tag{4}$$

т.е. фаза вынужденных колебаний станет противоположной фазе возмущающей силы. При этом амплитуда φ_a вынужденных колебаний при любых соотношениях p и k сохранит свое значение:

$$\varphi_a = \frac{M_0}{J\left|k^2 - p^2\right|}. \qquad (5)$$

Как следует из решений (2)—(5) уравнения (1), резонансное состояние системы будет при $k=p$, и при полном отсутствии диссипации это приведет к неограниченному возрастанию амплитуды периодических колебаний. Поскольку в любой реальной системе диссипация имеет место, то можно рекомендовать эксплуатационный режим движения платформы при $p \approx k$, при котором энергетические затраты внешнего возбудителя будут минимальными и их величина определяется только компенсацией конструкционного демпфирования в связях стенда.

Другие характеристики движения платформы, имеющей упругую связь со стойкой и возбуждаемой периодической силой, определятся из расчета отношения амплитуды M_0 гармонической составляющей силового нагружения к амплитуде вынужденных колебаний:

$$k_{дин} = \frac{M_0}{J\left|k^2 - p^2\right|}$$

и поскольку $\varphi_{ст} = \frac{M_0}{C}$, а с учетом $k^2 = \frac{C}{J}$ или $C = k^2 J$, коэффициент динамичности будет таким:

$$k_{дин} = \frac{\dfrac{M_0}{J\left|k^2 - p^2\right|}}{\dfrac{M_0}{k^2 J}} = \frac{k^2}{k^2 - p^2} = \frac{1}{1 - \dfrac{p^2}{k^2}}. \qquad (6)$$

Отметим, что при $p=k$ $\quad k_{дин} \to \infty$.

Математическая модель движения платформы с демпфером при гармоническом характере внешнего силового возбуждения. Дифференциальное уравнение углового движения платформы с демпфером в известных обозначениях имеет вид:

$$J\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + C\varphi = M_0 \sin pt, \qquad (7)$$

при $\frac{b}{J} = 2n$ и $\frac{C}{J} = k^2$ получим:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = \frac{M_0}{J}\sin pt. \qquad (8)$$

При $n<k$, т.е. при ограниченном демпфировании, характеристическое уравнение $r^2+2nr+k^2=0$ имеет комплексные корни $r = -n \pm \sqrt{n^2 - k^2}$ и решение (8) будет таким:

$$\varphi = e^{-nt}(C_1 \cos\sqrt{k^2 - n^2}t + C_2 \sin\sqrt{k^2 - n^2}t) + \\ + \frac{M_0}{J\sqrt{(k^2 - n^2) + 4n^2p^2}}\sin(pt - \delta), \qquad (9)$$

где δ — угол, характеризующий отставание фазы перемещения от фазы сил

$$tg\delta = \frac{2np}{k^2 - p^2}.$$

Как видно по (9), с течением времени свободные колебания, определяемые первым компонентом уравнения (9), затухают и амплитуда вынужденных колебаний становится стационарной:

$$\varphi_a = \frac{M_0}{J\sqrt{(k^2 - n^2) + 4n^2p^2}}, \qquad (10)$$

а коэффициент динамичности будет таким:

$$k_{дин} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \dfrac{p^2}{k^2}) + \dfrac{4n^2p^2}{k^4}}}. \qquad (11)$$

Максимальное значение $k_{дин}$ имеет при $p = \sqrt{k_2 - 2n^2}$, т.е. вблизи значения $p=k$, как это имело место в системе без демпфера, но изменение $k_{дин}$ зависит от «n» и является уже ограниченным.

При наличии «n» и упругой связи платформы со стойкой колебательный процесс, возбуждаемый гармоническим или близким к нему внешним силовым возмущением, будет устойчивым с частотой внешнего силового возбуждения.

Математическая модель движения платформы, имеющей упругую связь со стойкой в среде с вязким трением и силовым возбуждением постоянной силой, направленной в сторону движения. Составим математическую модель движения платформы, функционирующей в точном соответствии с предложенным нами способом раскачки платформы стенда [1, 2]. Платформа приводится в движение высокомоментным реверсным электродвигателем, подающим постоянный по величине момент в направлении движения платформы. Переключение направления силового импульса от двигателя происходит переключением контактов в крайних положениях платформы, размах угловых колебаний которой определяется установленным зазором Δ, величину которого можно регулировать.

Дифференциальное уравнение малых колебаний платформы в известных обозначениях имеет вид [4—6]:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = M_0 sign\dot{\varphi}. \qquad (12)$$

Отметим, что (12) моделирует движение любой автоколебательной системы, имеющей стационарное силовое возбуждение, к такой системе можно отнести односторонний регулятор хода часовых механизмов при условии, что электромагнитный возбудитель имеет постоянную характеристику силового поля, создаваемого катушкой возбуждения, действующей на крутильный маятник регулятора хода.

При ограниченном демпфировании, т.е. при $n<k$ и при $n<0$, $M_0>0$ и $k=const$, считая, что при $\dot{\varphi}<0$ и начальных условиях $t=0$, $\varphi=\varphi_1$, $\dot{\varphi}=0$ (крайнее положение платформы), уравнение (12) имеет решение:

$$\varphi = e^{-nt}\left[\begin{array}{l}(\varphi_1 + \dfrac{M_0}{k^2})\cos\dfrac{\pi t}{T} + \\ + \dfrac{T}{\pi}n(\varphi_1 + \dfrac{M_0}{k^2}\sin\dfrac{\pi t}{T}\end{array}\right] - \frac{M_0}{k^2}, \qquad (13)$$

где $T = \frac{\pi}{\sqrt{k^2 - n^2}}$ — полупериод колебаний платформы.

При $t=T$

$$\varphi = \varphi_2 = e^{-nT}(\varphi_1 + \frac{M_0}{k_2}) - \frac{F}{k^2}.$$

$$\dot{\varphi} = 0. \qquad (14)$$

При $\dot{\varphi}>0$ и начальных условиях $t=0$, $\varphi=\varphi_2$, $\dot{\varphi}=0$ (другое крайнее положение платформы), решение (12) будет таким:

$$\varphi = e^{-nt}\left[\begin{array}{l}(\varphi_2 + \dfrac{M_0}{k^2})\cos\dfrac{\pi t}{T} + \\ + \dfrac{T}{\pi}n(\varphi_2 + \dfrac{M_0}{k^2}\sin\dfrac{\pi t}{T}\end{array}\right] + \frac{M_0}{k^2}. \qquad \textbf{(15)}$$

При t=T

$$\varphi = \varphi_3 = e^{-nT}(\varphi_2 - \frac{M_0}{k_2}) + \frac{M_0}{k^2},$$

или

$$\varphi = \varphi_3 = e^{-2nT}\varphi_1 + \frac{M_0}{k_2}(1 + e^{-nT})^2. \qquad \textbf{(16)}$$

Для периодического движения должно быть $\varphi_3 = \varphi_1 = \varphi_0$ и, следовательно,

$$\varphi_0 = \frac{1 + e^{-nT}}{1 - e^{-nT}}\frac{M_0}{k^2}. \qquad \textbf{(17)}$$

Система приходит к периодическим колебаниям с периодом 2T и амплитудой φ_0 по (17), картина фазовой плоскости такого движения представлена на рис. 1.

Полученное по (17) φ_0 представляет собой максимальное угловое отклонение платформы от положения равновесия, это отклонение φ_0 есть амплитуда установившихся периодических колебаний. При этом, как следует из (17), значение φ_0 не зависит от начальных условий, а зависит исключительно от параметров системы.

Если фазовая траектория, соответствующая автоколебаниям системы будет замкнутой, как на рис. 1, то колебания системы будут устойчивыми, независимо от начальных условий при t=0, $\varphi = \varphi_1$, $\dot{\varphi} = 0$ или при t=T (в конце первого и в начале второго полуцикла) $\varphi = \varphi_3$, $\dot{\varphi} = 0$.

Подобные автоколебательные системы относятся к системам, способным совершать незатухающие колебания за счет постоянных источников энергии, причем поступление энергии, расходуемой системой на преодоление сопротивлений, регулируется самой системой.

В подобной системе период автоколебаний $T = \dfrac{2\pi}{P}$ оказывается равным периоду $T = \dfrac{2\pi}{\sqrt{k^2 - n^2}}$ затухающих колебаний в линейной системе, но это не обязательно, поскольку характеристики колебаний определяются только параметрами системы (M_0, k, n).

Особенности модели движения платформы с односторонним силовым возбуждением постоянной силой, направленной в сторону движения. Вариант подобной системы технически реализуем системой, предлагаемой нами, элементы которой представлены в [1, 2]. Пусть система приводится в движение электромеханическим возбудителем, который обеспечивает незатухающие колебания платформы. Возбудитель регулируется самой системой и может подавать в систему постоянный, но однонаправленный силовой поток в форме однонаправленных прямоугольных импульсов момента постоянной величины.

В такой автоколебательной системе период движения платформы распадается на два полупериода. Первый полупериод характеризуется вынужденным движением платформы под действием постоянного силового момента от высокомоментного двигателя, и это движение моделируется дифференциальным

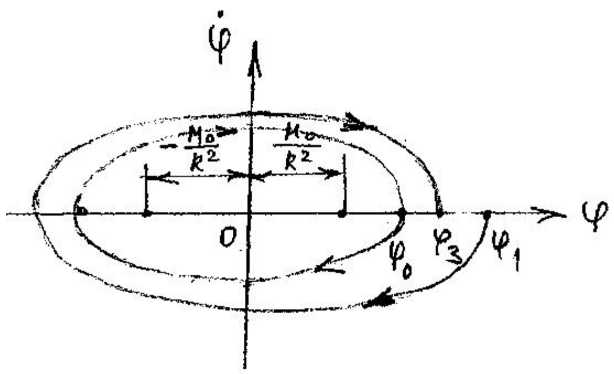


Рис. 1. Фазовая диаграмма движения системы

уравнением (12):

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = M_0 sign\dot{\varphi}.$$

Во втором полупериоде двигатель отключен и платформа совершает свободные колебания в соответствии с уравнением:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = 0.$$

Для устойчивого колебательного процесса необходимо установить и обеспечить выполнение начальных условий при t=0 и t=T, а также совпадение начальных условий при t=0 и t=$2T$.

При наличии диссипативных потерь от сил трения, мало зависящих от $\dot{\varphi}$ (кулоново трение), уравнение свободного движения дополняется компонентом $M_{тр} = -M_{тр} sign\dot{\varphi}$, т.е. преобразуется к виду:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = -M_{тр} sign\dot{\varphi}. \qquad \textbf{(18)}$$

Поскольку амплитуда углового движения платформы по нашему предложению устанавливается зазором Δ, то внешний источник энергии должен за активный полупериод T подать в систему энергию, равную ее диссипации от сухого трения, поэтому силовая характеристика двигателя M_0 однонаправленного возбуждения должна быть $M_0 \geq M_{тр}$, с учетом равенства угловых перемещений на полупериодах.

Влияние неупругих сопротивлений на движение установочной платформы. Вязкое сопротивление направлено против скорости и пропорционально его значению. Если в силовую характеристику сопротивления скорость входит в первой степени, то такая модель движения будет линейной при постоянных значениях коэффициентов при других производных искомой функции.

Задача об отыскании закономерности движения в этих условиях может быть решена аналитически в конечном виде для свободного движения системы или при интегрируемой функции изменения внешнего силового возбуждения в модели вынужденного движения.

В любом случае представляет интерес изменение амплитуд свободных колебаний в системе с вязким сопротивлением, пропорциональным скорости движения систем.

В обширной литературе по теории колебаний и ее прикладным задачам, например, в [7] приводятся доказательства, что частота k_1 собственных колебаний системы с демпфером остается неизменной и практически равна частоте собственных незатухающих колебаний «k» идеализированной системы, т.е. $k_1 = \sqrt{k_2 - 2n^2}$, но при $n<<k$, т.е. при слабом демпфировании, что наблюдается в большинстве технических систем, т.е. имеет место $k_1 \approx k$.

Колебания в системе с демпфером затухают, о чем свидетельствует первый сомножитель e^{-nt} в уравнении для свободных колебаний и отношение каждой предыдущей к последующей амплитуде $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = ... = e^{nt}$, т.е. последовательность отношений пиковых значений амплитуд образует геометрическую прогрессию, а логарифм отношений пиковых значений $\ln\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \delta$ называют логарифмическим декрементом затухания, который является характеристикой диссипативных свойств колебательной системы.

Поскольку в ряде случаев удобно определить отдельно работу сил трения за цикл, что полезно для расчета объемов восполнения энергии колебательной системы и выбора силовой характеристики M_0 двигателя, а отнесение работы трения к энергии колебательного процесса за цикл дает значение коэффициента ψ поглощения, который в [7] определен как $\psi = 2\delta$, т.е. коэффициент поглощения вдвое больше коэффициента логарифмического декремента колебаний, а работа двигателя $M_0\varphi$ на полуцикле должна компенсировать энергию поглощения от диссипативных потерь на цикле движения.

При наличии в колебательной системе сухого (кулонова) трения, оно может быть представлено в дифференциальном уравнении в виде нелинейного компонента в том числе переменного коэффициента при первой производной искомой функции движения.

Точное решение такого уравнения невозможно, поэтому иногда прибегают к линеаризации значения этого коэффициента, перевода его в эквивалентный коэффициент вязкости, или к упрощенному учету в уравнении, например:

$$M_{тр}(\dot{\varphi}) = \pm\frac{M_{тр}}{J},$$

при этом, если $\dot{\varphi}<0$, то $M_{тр}$ положителен, если $\dot{\varphi}>0$, то знак момента изменится $-M_{тр}$.

Частота колебаний системы с кулоновым трением равна частоте свободных колебаний идеализированной системы, а уменьшение амплитуды колебаний за цикл $t = T = \frac{2\pi}{k}$ равно [8]:

$$\Delta\varphi = \frac{4M_{тр}}{C}. \quad \textbf{(19)}$$

Физически $\frac{M_{тр}}{C}$ представляет собой статическое отклонение системы от равновесного положения под действием момента $M_{тр}$ кулонова трения, т.е. амплитуда колебаний при наличии кулонова трения во время движения за каждый период убывает на одну и ту же величину, т.е. уменьшается по закону арифметической прогрессии в отличие от вязкого трения, обусловливающего убывание амплитуд по закону геометрической прогрессии.

Эти закономерности следует учитывать как при решении общих задач о движении, так и для создания технического проекта предлагаемой нами автоколебательной системы с двусторонним и односторонним внешним силовым возбуждением.

Таким образом, разработана и приведена гамма дифференциальных уравнений, моделирующих движение платформы в частных случаях как комбинаций параметрических свойств платформы и внешнего возбуждения.

В целом материал статьи представляет собой научную базу конструкторской проработки экспериментального стенда на уровне технического проекта.

Библиографический список

1. Балакин, П. Д. Обоснование выбора схемы универсального стенда для экспериментального определения геометрии сложных реальных техногенных объектов / П. Д. Балакин, Ю. А. Бурьян // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 47—51.
2. Балакин, П. Д. Системы раскачки и поддержания амплитуды колебаний платформ испытательного стенда / П. Д. Балакин, Ю. А. Бурьян // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 1 (127). — С. 47—50.
3. Балакин, П. Д. Динамика машин: учеб. пособие / П. Д. Балакин. — Омск : ОмГТУ, 2006. — 320 с.
4. Блехман, И. И. Вибрации в технике : справ. : в 6 т. / Под ред. И. И. Блехмана. — М. : Машиностроение, 1979. — Т. 2. — 351 с.
5. Бутенин, Н. В. Введение в теорию нелинейных колебаний : учеб. пособие для втузов / Н. В. Бутенин, Ю. И. Неймарк, Н. А. Фуфаев. — 2-е изд., испр. — М. : Наука, 1987. — 384 с.
6. Бутенин, Н. В. Элементы теории нелинейных колебаний / Н. В. Бутенин. — Л. : Судпромгиз, 1962. — 194 с.
7. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. — 3-е изд., доп. и перераб. / Я. Г. Пановко. — Л. : Машиностроение, 1976. — 320 с.
8. Яблонский, А. А. Курс теории колебаний : учеб. пособие для втузов / А. А. Яблонский, С. С. Норейко. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Высшая школа, 1975. — 248 с.

БАЛАКИН Павел Дмитриевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой машиноведения.
БУРЬЯН Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой основ теории механики и автоматического управления.
Адрес для переписки: tmm@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 06.10.2014 г.

УДК 621.01

П. Д. БАЛАКИН
Ю. А. БУРЬЯН

Омский государственный
технический университет

РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РАСКАЧКИ ПЛАТФОРМ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Обоснованы конструкция и система регулирования движением стенда для определения инерционных характеристик и испытаний на виброустойчивость сложных техногенных объектов. Сформулированы общие подходы к составлению дифференциальных уравнений движения установочной платформы с объектом при силовом возбуждении общего вида и частных его разновидностей.

Ключевые слова: стенд, установочная платформа, регулятор движения, внешнее силовое возбуждение, дифференциальные уравнения.

1. Выбор стабилизирующего регулятора колебаний платформ стенда. В [1] и [2] нами предложена схема универсального стенда для экспериментального определения геометрии масс и испытаний на виброустойчивость сложных реальных техногенных объектов. Объект устанавливается на платформу, способную совершать угловые колебания, при этом платформа снабжается упругой связью со стойкой, инерционные характеристики платформы известны, а объекта — определяются по частоте собственных колебаний платформы с объектом. Стенд предусматривает перестановку объекта на платформе, а также последовательное соединение платформ с возможностью их колебаний в разных плоскостях, в том числе стенд способен реализовать крутильные колебания платформы с объектом.

Испытания объекта на виброустойчивость проводятся на режимах вынужденных колебаний платформы с объектом, силовое возбуждение угловых колебаний генерируется различными способами, частота возбуждения и направленность силовых импульсов регулируются позиционным регулятором системы раскачки стенда на экономичных режимах, близких к резонансным.

В целом стенд представляет собой автономную, замкнутую систему автоматического регулирования движением платформы с объектом, система снабжена регулятором непрямого действия. На режимах свободных колебаний стенд вырождается в консервативную систему периодического движения без энергетической внешней подпитки. В [2] рассмотрены возможные способы создания стационарных вынужденных колебаний установочной платформы с помощью системы бесконтактной ее раскачки с регулируемыми и контролируемыми амплитудой и частотой.

Общие требования технического задания к созданию подобной системы можно свести к некоторым обязательным:

— генератор периодического силового возбуждения колебаний должен быть размещен непосредственно на установочной платформе либо связан с ней посредством физических полей или сред;

— угловая жесткость связи платформы со стойкой и частота силового возбуждения должны быть регулируемыми;

— для минимизации энергии возбуждения частота периодического силового внешнего возбуждения должна быть близкой к частоте собственных колебаний платформы с объектом.

Выделим основные возбудители колебаний установочной платформы, вполне пригодные для технической реализации.

1. Инерционный возбудитель колебаний. Генерирует силовые импульсы, как правило, гармонической формы. Размещается непосредственно на платформе и его инерционная масса должна совершать неинерциальное движение. Переменная кинетическая реакция этой массы на систему, создающую подобное движение, будет передаваться на платформу. Частота силового возбуждения регулируется электроприводом с частотным управлением.

Техническая реализация инерционного возбудителя также может быть различной, например, простейшим решением будет встречное вращение дебалансов, а также движение неуравновешенного сателлита в планетарной схеме, в том числе движение сателлита, имеющего диаметр, равный половине диаметра эпицикла. Большими возможностями в качестве возбудителей колебаний обладают цикловые механизмы общего вида, содержащие звенья, совершающие неинерциальное движение (синусные, кривошипно-коромысловые и ползунные механизмы).

2. Электромагнитные, электромеханические возбудители колебаний. Этот тип возбудителей использует силовое взаимодействие электромагнитных полей и характеризуется простотой управления частотой и амплитудой движения платформы посредством управления компонентами подводимой мощности.

3. Гидравлические и пневматические возбудители колебаний. В гидравлических возбудителях может быть использовано неинерциальное движение рабочей жидкости, изменяющее положение центра

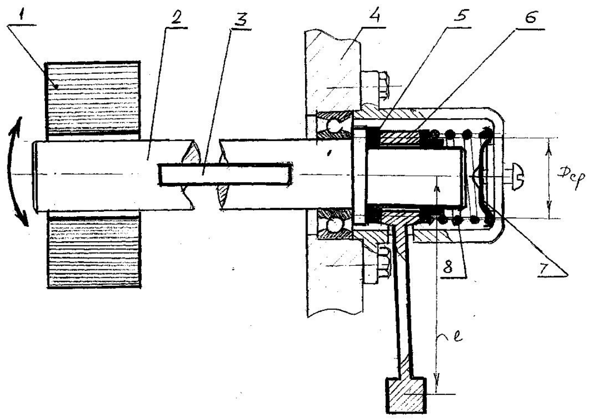


Рис. 1. Позиционный регулятор системы раскачки стенда
1 — высокомоментный реверсный электродвигатель;
2 — приводной вал платформы;
3 — фрагмент платформы;
4 — корпус (стойка) стенда;
5 — фрикционная накладка;
6 — рычаг регулятора;
7 — устройство создания нормальных сил;
8 — упругий элемент.

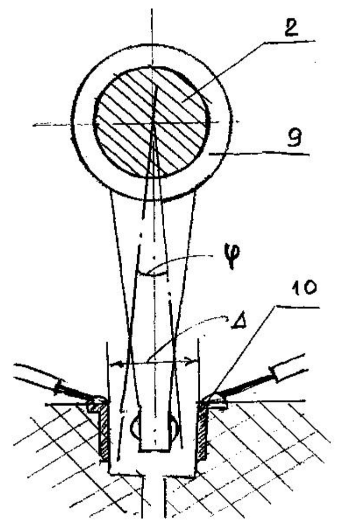


Рис. 2. Рычаг регулятора
2 — приводной вал платформы;
9 — фрикционная поверхность рычага;
10 — электрические контакты управления реверсом электродвигателя.

масс платформы или приводимых жидкостью инерциальных тел. В пневматических возбудителях потенциальная энергия сжатия газа (воздуха) преобразуется либо в движение неуравновешенной турбины, либо в пульсирующее истечение газа из сопел для создания периодически изменяемой реактивной силы. Как вариант перспективно использовать пульсирующее истечение газа для парциального воздействия газодинамического потока непосредственно на платформу или ее элементы, выполняющие парусные функции.

Остановим свой выбор на электромеханическом позиционном возбудителе, состоящем из высокомоментного реверсивного электродвигателя, непосредственно связанного с приводимой им в движение платформой и вспомогательных конструктивных элементов, позволяющих обеспечить колебательное движение платформы с заданной амплитудой и частотой (рис. 1 и 2).

Вспомогательные элементы по сути представляют собой обратную связь позиционной системы автоматического регулирования движением.

Система раскачки платформ стенда (рис. 1) состоит из высокомоментного реверсивного двигателя 1, реверс которого происходит переключением электрических контактов 10 (рис. 2) рычагом 6 (рис. 1), имеющим регулируемое угловое движение φ, получаемое посредством фрикционного контакта поверхности 9 рычага с накладкой 5 (рис. 1), жестко связанной с приводным валом 2 (рис. 1) платформы 3 (рис. 1). Размах колебаний платформы регулируется зазором Δ (рис. 2), но из-за ее инерционности может быть потенциально больше чем установленный угол φ, в этом случае разность углового перемещения платформы и рычага будет скомпенсирована скольжением во фрикционном контакте накладки 5 с рычагом 6. Уровень сил трения создается упругим элементом 8 и регулируется статической деформацией 8 с помощью устройства 7. Если обозначить N — уровень нормальных сил, то момент трения во фрикционном контакте рычага 6 с накладкой 5 будет таким:

$$M_{тр} = Nf\,\frac{D_{ср}}{2},$$

где f — коэффициент трения материалов, составляющих фрикционный контакт;
$D_{ср}$ — средний диаметр поверхности трения (рис. 1).

Усилие P, для замыкания электрических контактов, определяется как

$$P = \frac{M_{тр}}{\ell} \text{ или } P = \frac{NfD_{ср}}{2\ell}.$$

Регулируемая амплитуда $\varphi/2$ угловых колебаний платформы 3 и рычага 6 создается изменяемым зазором Δ в контактной группе 10, где $\varphi = \frac{\Delta}{\ell}$.

Процесс раскачки производится за счет силового электромагнитного взаимодействия двигателя с приводным валом платформы. По отношению к платформе импульсное силовое воздействие на него двигателем 1 будет внешним, а сам характер силовых импульсов может быть различным. Например, силовой момент M_0 будет постоянным на обеих фазах прямого и обратного движений и направлен в сторону скорости углового движения платформы. Возможен вариант такого силового воздействия только на одной фазе, а на второй движение платформы станет свободным и будет происходить за счет упругой установки платформы на стойке. Возможен вариант импульсного воздействия только на части одной фазы, а также вариант гармонически изменяемого силового момента на обеих фазах или на одной из них. Очевидно, что динамические модели движения платформы будут различаться и только часть из них, будучи линеаризованной, станет разрешимой аналитически в конечном виде.

2. Общие подходы к составлению дифференциальных уравнений вынужденных колебаний механической системы с одной степенью свободы. Моделированию подлежит общий случай движения системы с одной степенью свободы около положения устойчивого равновесия, когда на подвижную часть системы действуют возмущающие силы (или момент возмущающих сил), восстанавливающие силы (или моменты сил), силы сопротивления (моменты сил). Под действием сил возникают вынужденные линейные (или угловые) колебательные движения подвижной части системы.

Несмотря на то, что стабилизирующий регулятор колебания является позиционным и его включение и выключение обусловлено назначением конкретных значений предельных угловых обобщенных координат платформы, тем не менее частота возмущающего момента M_0 должна быть близкой к частоте собственных колебаний платформы, а она вполне определяема, поэтому, даже принимая $M_0=const$, импульсы M_0 можно считать зависимыми и от времени.

Восстанавливающие силы (моменты) имеют потенциал, т.е. являются консервативными и зависят от обобщенной координаты φ платформы. Силы (моменты) сопротивления пропорциональны скорости $\dot{\varphi}$, следовательно, кинетическая энергия T, потенциальная энергия $П$ и функция рассеивания R могут быть представлены квадратичными формами:

$$T = \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2;\; П = \frac{1}{2}C\varphi^2;\; R = \frac{1}{2}b\dot{\varphi}^2. \qquad (1)$$

Обобщенные силы получим дифференцированием (1)

$$M = \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = J\ddot{\varphi};\; M_П = \frac{\partial П}{\partial \varphi} = C\varphi;\; M_R = \frac{\partial R}{\partial \dot{\varphi}} = b\dot{\varphi}. \qquad (2)$$

Следуя [3], уравнение Лагранжа для рассматриваемой одноподвижной системы общего вида будет таким:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = M + M_П + M_R. \qquad (3)$$

Используя для (3) выражения (2), при $J=const$ и $T = \frac{J\dot{\varphi}^2}{2}$, получим

$$J\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + C\varphi = M(t), \qquad (4)$$

или после деления на J уравнение движения платформы преобразуется к известному виду:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = \frac{1}{J}M(t), \qquad (5)$$

где $2n = \frac{b}{J}$ — коэффициент диссипации, а $k^2 = \frac{C}{J}$ — квадрат частоты собственных колебаний платформы.

Уравнение (5) является общим дифференциальным уравнением вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы.

В частном случае при отсутствии сопротивления, т.е. при $b=0$ или $n=0$:

$$\ddot{\varphi} + k^2\varphi = \frac{1}{J}M(t), \qquad (6)$$

В случае, если $M(t) = const$ и $\frac{M(t)}{J} = M_0$, а силовой момент направлен по скорости, получим:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = M_0 sign\dot{\varphi}. \qquad (7)$$

Общее решение дифференциального уравнения (5) находят по известному алгоритму. Прежде всего, находят общее решение однородного уравнения без правой части, определяющее собственные колебания системы, характеристики которых необходимы для определения и назначения вынужденных режимов работы стенда, причем самым энергетически экономичным режимом будет режим близкий к резонансному, когда эксплуатационная частота «p» и частота собственных колебаний «k» совпадают.

Однородное уравнение:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = 0 \qquad (8)$$

при $n<k$ (случай малого сопротивления или ограниченной диссипации) имеет решение:

$$\varphi = e^{-nt}\left(C_1\cos\sqrt{k^2 - n^2}t + C_2\sin\sqrt{k^2 - n^2}t\right). \qquad (9)$$

Первый сомножитель e^{-nt} характеризует затухание по времени колебаний, обусловленных вязким сопротивлением. При его отсутствии $n=0$ (идеальная система), сомножитель будет равен единице и решение (8) будет таким:

$$\varphi = C_1\cos kt + C_2\sin kt, \qquad (10)$$

т.е. в системе даже при разовом возмущении установятся незатухающие колебания, а постоянные C_1 и C_2 интегрирования определятся по начальным условиям:

если при $t=0$, $\varphi=\varphi_0$, то $C_1=\varphi_0$,

если при $t=0$, $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0$, то $C_2 = \frac{\dot{\varphi}_0}{k}$ и

$$\varphi = \varphi_0\cos kt + \frac{\dot{\varphi}_0}{k}\sin kt. \qquad (11)$$

При наличии вязкого трения ($n\neq0$, но $n<k$), введя обозначения $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$, где k_1 — частота затухающих колебаний, реально при $n<<k$, $k_1\approx k$, однако строгое решение будет таким:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-nt}(\cos k_1t + \frac{n}{k_1\sin k_1t}) + \frac{\varphi_0}{k_1}e^{-nt}\sin k_1t. \qquad (12)$$

Первый член (12) моделирует колебания системы, вызванные начальным отклонением φ_0 системы от равновесного положения, а второй член (12) — колебания, возникающие в результате сообщения системе начальной скорости $\dot{\varphi}_0$.

Если на рассматриваемую систему, кроме восстанавливающей силы и силы сопротивления с некоторого момента времени t_1 действует возмущающая сила $M(t)$, то она за промежуток времени dt_1 вызовет дополнительное приращение обобщенной скорости $d\dot{\varphi}_{gon}$, которую можно определить из закона сохранения импульса:

$$d\dot{\varphi}_{gon} = \frac{1}{J}M(t)dt_1 \qquad (13)$$

и значение этого приращения можно припасовать к $\dot{\varphi}_0$ из (12), а в конечных приращениях дополнительная скорость определится зависимостью:

$$\Delta\dot{\varphi}_{gon} = \frac{1}{J}M(t)\cdot(t - t_1). \qquad (14)$$

В целом, решение (5), с учетом внешнего силового возбуждения, будет отличаться от (12) дополнительным слагаемым:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-nt}\left(\cos k_1t + \frac{n}{k_1\sin k_1t}\right) + \frac{\dot{\varphi}_0}{k_1}e^{-nt}\sin k_1t + \\ + \frac{1}{Jk_1}\int_0^1 M(t_1)e^{-n(t-t_1)}\sin k_1(t - t_1)dt_1. \qquad (15)$$

В частном случае для системы, характеризуемой при $t=0$, $\dot{\varphi}_0 = 0$, $\varphi=\varphi_0=0$, получим:

$$\varphi = \frac{1}{Jk_1}\int_0^1 M(t_1)e^{-n(t-t_1)}\sin k_1(t-t_1)dt. \quad (16)$$

Уравнение, моделирующее свободные и вынужденные колебания системы с учетом сопротивления и возбуждения внешними силами, имеющими произвольный характер. Затухающие колебания, вызванные начальным отклонением и начальной скоростью, отсутствуют по причине отсутствия φ_0 и $\dot{\varphi}_0$, вернее, при $\varphi_0=0$ и $\dot{\varphi}_0 = 0$.

Если сопротивление мало $n=0$, а φ_0 и $\dot{\varphi}_0$ имеют место, решение сводится к виду:

$$\varphi = \varphi_0\cos kt + \frac{\dot{\varphi}_0}{k}\sin kt + \frac{1}{Jk_1}\int_0^1 M(t_1)\sin k(t-t_1)dt_1. \quad (17)$$

По уравнению (17) определяются свободные и вынужденные колебания системы, вызванные начальным отклонением, начальной скоростью и внешним силовым возбуждением общего вида, но без учета сил сопротивления (идеализированная система).

Наконец, имеет место модель движения системы при $t=0$, $n=0$, $\varphi_0=0$ и $\dot{\varphi}_0 = 0$, ее решение:

$$\varphi = \frac{1}{Jk_1}\int_0^1 M(t_1)\sin k(t-t_1)dt_1. \quad (18)$$

По уравнению (18) определяют свободные и вынужденные колебания, вызванные внешним силовым возбуждением общего вида, при нулевых значениях позиции, скорости и без учета сопротивления.

Отметим особо, что все приведенные модели движения пригодны при наличии внешних возмущающих сил любой природы, любой длительности и любого характера их изменения. Приложение приведенных моделей особенно целесообразно в случаях, когда сила не является периодической, а произвольно изменяет величину и направление, причем аналитическое выражение этой силы неизвестно и ее действие может быть учтено только операциями численного интегрирования на избранных интервалах интегрирования.

Библиографический список

1. Балакин, П. Д. Обоснование выбора схемы универсального стенда для экспериментального определения геометрии сложных реальных техногенных объектов / П. Д. Балакин, Ю. А. Бурьян // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 47—51.
2. Балакин, П. Д. Системы раскачки и поддержания амплитуды колебаний платформ испытательного стенда / П. Д. Балакин, Ю. А. Бурьян // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 1 (127). — С. 47—50.
3. Яблонский, А. А. Курс теории колебаний : учеб. пособие втузов / А. А. Яблонский, С. С. Норейко. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Высшая школа, 1975. — 248 с.

БАЛАКИН Павел Дмитриевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой машиноведения.
БУРЬЯН Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой основ теории механики и автоматического управления.
Адрес для переписки: tmm@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2014 г.

Книжная полка

621.791/Д18

Данильцев, Н. Н. Проектирование сварных конструкций : конспект лекций / Н. Н. Данильцев. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 174 с. — ISBN 978-5-8149-1857-4.

Рассмотрены основные принципы расчета и проектирования сварных конструкций. Представлены основы расчета стыковых и угловых сварных соединений, выполненных дуговыми способами сварки, соединений, выполненных контактной стыковой, точечной и роликовой сваркой. Рассмотрены особенности расчета сварных соединений, работающих при переменной нагрузке, в условиях усталости, особенности расчета на устойчивость. Для анализа работы конструкций при переменной нагрузке представлен раздел по линиям влияния. На основе вышеперечисленных основных принципов расчета приведены методы расчета и проектирования конкретных конструкций, таких как сварные балки, сварные фермы, сварные стойки и листовые конструкции (сосуды, резервуары). Предназначено для студентов бакалаврского направления 150700.62 «Машиностроение» с профильной подготовкой «Оборудование и технология сварочного производства», а также для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» и специальности 150701 «Проектирование технологических машин и комплексов».

621.6/Д44

Диагностика и ремонт трубопроводов. Методы, совершенствование, применение / А. Г. Гумеров [и др.] ; под ред. А. Г. Гумерова. — М. : Недра, 2014. — 147 с. — ISBN 978-5-8365-0422-9.

Проведен анализ существующих и предложены новые методы диагностики самых распространенных осложнений трубопроводов — утечек и уменьшения проходного сечения. Предложены технологии и технические средства для ремонта трубопроводов по методу «труба в трубе» и без остановки перекачки.

УДК 62-567.2:534.11

Ю. А. БУРЬЯН
В. Н. СОРОКИН
М. В. СИЛКОВ
Ю. Ф. ГАЛУЗА

Омский государственный
технический университет

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ИНЕРЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ НА БАЗЕ РЕЗИНОКОРДНОЙ ОБОЛОЧКИ

В статье рассмотрены математическая модель и основы выбора параметров виброизоляционной опоры, состоящей из параллельно соединенных резинометаллического амортизатора и гидравлического инерционного преобразователя движения на базе резинокордной оболочки.
В работе показано, что выбором серийно выпускаемого амортизатора (например, типа АПС) и настройки характеристик гидравлического инерционного преобразователя движения можно обеспечить необходимую частоту настройки виброопоры для улучшения виброизоляции энергетических установок в наиболее опасных диапазонах частот.

Ключевые слова: виброизоляция, инерционный преобразователь движения, резинокордная оболочка, коэффициент передачи усилия.

Резинометаллические и пневматические упругие элементы давно и с успехом применяются в качестве виброизоляционных опор в различных отраслях промышленности, в том числе в судостроении. Одним из перспективных направлений повышения качества виброизоляции является использование гидравлических виброизоляционных опор (гидроопор) с инерционным преобразователем или по терминологии работ [1, 2] с гидравлическим инерционным трансформаторами (ГИТ).

Перспективы использования и основы расчёта гидроопор с ГИТ, разработанные институтом машиноведения им. Благонравова, достаточно полно изложены в работах [1, 2].

В данной работе рассмотрен вариант использования ГИТ в системе виброизоляции как отдельного устройства на базе резинокордной оболочки (РКО), заполненной жидкостью. В этом случае имеется возможность варьирования в широких пределах характеристиками инерционных трубок с ГИТ вследствие достаточно большого объёма РКО с жидкостью и, кроме того, сохраняются достоинства освоенных промышленностью, надёжных и долговечных применённых в опоре упругих элементов и РКО [1–3].

В качестве примера на рис. 1 приведена принципиальная схема виброизоляционной опоры с упругим элементов типа АПС и ГИТ на базе РКО типа И-09.

Принцип действия опоры на рис. 1 заключается в том, что кроме виброизоляционного эффекта от резинометаллического элемента (АПС) при действии на опору периодического усилия жидкость в ГИТ и, следовательно, в инерционных трубках будет совершать возвратно-поступательное движение. Мембрана 4 служит для компенсации объёма вытесняемой жидкости при перемещении опорной поверхности 1 по отношению к основанию 6 и возврата жидкости при движении опорной поверхности вверх. Жидкость в отверстиях блока инерционных трубок будет иметь скорость большую, чем скорость опорной поверхности на величину, равную отношению площади условного поршня (в первом приближении эквивалентная площадь сечения РКО) к площади сечения инерционной трубки. Вследствие этого на вывешиваемый на опоре силовой агрегат и основание будет действовать дополнительная инерционная нагрузка с приведённой массой, на 2–3 порядка превышающая массу жидкости в инерционных трубках. Динамический эффект от этой инерционной нагрузки будет заключаться, как показано в [1], в значительном снижении передачи вибрационного усилия на основание в узкой области частот настройки виброопоры с ГИТ.

Необходимо отметить, что точное определение площади условного поршня, демпфирующей характеристики инерционных трубок и масс жидкости, участвующих в движении, представляет отдельную и достаточно сложную задачу.

Для составления математической модели и оценки эффективности опоры с ГИТ целесообразно, как это сделано в [1], разделить упругую составляющую и инерционную, связанную с гидравлическим преобразователем движения.

Расчётная схема раздельного представления упругой и инерционной составляющей приведена на рис. 2.

При составлении математической модели механической системы с одной степенью свободы и двумя телами (абсолютно твёрдое тело с массой m_0 и жидкость с движущейся массой $m_1 = m' + m'' + m_ж$,

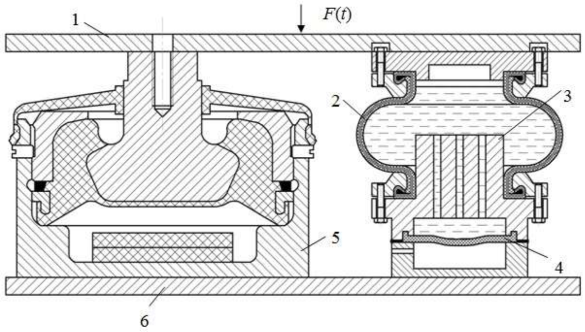


Рис. 1. Принципиальная схема опоры

1 — опорная поверхность; 2 — резинокордная оболочка И-09; 3 — блок инерционных трубок; 4 — мембрана; 5 — виброизолятор АПС; 6 — основание; *F(t)* — усилие, действующее на опору со стороны виброактивного элемента

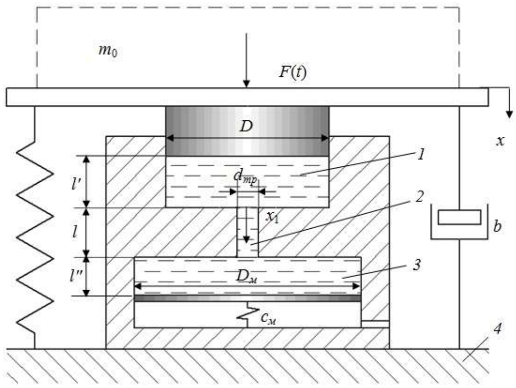


Рис. 2. Принципиальная схема разделения упругой и инерционной составляющей

***F(t)* — внешняя сила, *c* — коэффициент жёсткости резинометаллической опоры и резинокордной составляющей в ГИТ; *b* — коэффициент вязкого трения в АПС; m_0 — масса вывешиваемого тела; *D* и $d_{тр}$ — соответственно диаметр условного поршня и инерционной трубки; $D_м$ и $C_м$ — эквивалентные диаметр невесомого поршня и коэффициент жёсткости мембраны; *l* — длина инерционной трубки; *x*, $\dot{x}$ — перемещение и скорость поршня диаметра *D*; $\dot{x}_1$ — скорость жидкости в инерционной трубке; x_2 — перемещение поршня диаметром $D_м$; 1, 3 — полости опоры; 2 — инерционная трубка; 4 — фундамент**

m', m'' — масса движущейся жидкости в полостях 1 и 3, $m_ж$ — масса жидкости в инерционной трубке) примем, что фундамент неподвижен, диаметр инерционной трубки достаточно большой, движение жидкости имеет ламинарный характер, а движение рассматривается относительно положения равновесия.

Математическая модель в этом случае может быть представлена уравнением Лагранжа второго рода [4]

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} = Q - \frac{\partial \Pi}{\partial x}, \qquad (1)$$

где T — кинетическая энергия систем;

Q — обобщённая сила;

Π — потенциальная энергия упругих элементов системы.

Для кинетической энергии можно записать:

$$T = \frac{1}{2}m_0\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m'\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m''\dot{x}_2^{\,2} + \frac{1}{2}m_ж\dot{x}_1^{\,2},$$

или, учитывая, что $\dot{x}_1 = A\dot{x}/S_{тр}$, получим:

$$T = \frac{1}{2}(m_0 + m' + \frac{A^2}{S_м^2}m'' + \frac{A^2}{S_{тр}^2}m_ж)\dot{x}, \qquad (2)$$

где A — площадь сечения поршня;

$S_{тр}$ — площадь сечения инерционной трубки.

Потенциальная энергия и обобщённая сила определяются выражениями

$$\left.\begin{aligned}\Pi &= \frac{1}{2}cx^2 + \frac{1}{2}c_м\left(\frac{A}{S_м}\right)^2 x^2,\\ Q &= F(t) + b\dot{x}.\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Обозначая $m'_{пр}=m_ж A^2/S_{тр}^{\,2}$ и, учитывая малость масс m' и m'' по сравнению с m_0, в первом приближении для определения масс можно принять: $m'=Al'\rho$, $m''=S_м l''\rho$.

Если ввести обозначение $m=m_0+m'+$ $+m''A^2/S_м^{\,2}+m_ж A^2/S_{тр}^{\,2}$, то, подставляя (2) и (3) в (1) с учётом (4), получим

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + \left(c + \frac{A^2}{S_м^2}c_м\right)x = F(t). \qquad (4)$$

Усилие $R(t)$, передаваемое через опору на основание, будет определяться уравнением:

$$m'_{пр}\ddot{x} + b\dot{x} + \left(c + \frac{A^2}{S_м^2}c_м\right)x = R(t). \qquad (5)$$

Комплексный коэффициент передачи усилия будет иметь вид:

$$\tilde{K}_П(i\omega) = \frac{R(i\omega)}{F(i\omega)} =$$

$$= \frac{\left[\left(c + \frac{A^2}{S_м^2}c_м\right) - m'_{пр}\omega^2\right] + ib\omega}{\left[\left(c + \frac{A^2}{S_м^2}c_м\right) - \left(m + m'_{пр}\right)\omega^2\right] + ib\omega}. \qquad (6)$$

Тогда модуль коэффициента передачи по силе равен

$$K_П(\omega) = \left|\frac{R(i\omega)}{F(i\omega)}\right| =$$

$$= \frac{\sqrt{\left(c' - m'_{пр}\omega^2\right)^2 + b^2\omega^2}}{\sqrt{\left[c' - \left(m + m'_{пр}\right)\omega^2\right]^2 + b^2\omega^2}}, \qquad (7)$$

где $c'=c+c_м A^2/S_м^{\,2}$.

Переходя к безразмерным параметрам, получим

$$K_П(z) = \frac{1}{n+1}\,x$$

$$x\,\frac{\sqrt{\left(z^2 - n\right)^2 + 4\nu^2 n^2 z^2}}{\sqrt{\left(z^2 - \frac{n}{n+1}\right)^2 + 4\nu^2\,\frac{n}{n+1}^{\,2}\,z^2}}, \qquad (8)$$

где $z=\omega/\omega_0$, $\omega_0^{\,2}=c'/m_0$, $n=m/m_{пр}$, $\nu=b/2m\,\omega_0$.

Для определения приведённой массы можно воспользоваться выражением

$$m_{пр}=m_ж A^2/S^2, \qquad (9)$$

где A, S — площади условного поршня РКО и площадь всех инерционных трубок;

$m_ж$ — масса жидкости во всех инерционных трубках в статике.

Например, для РКО И-08 с малыми габаритными размерами 1500×90 мм расчёты приведённой массы дали следующие результаты. Для $A=28{,}4$ см², $S=0{,}71$ см² и высоте инерционных трубок $h=6$ см получаем $m_{пр}=6{,}5$ кг. При $n=32$ получаем $m_0=200$ кг, что соответствует номинальной нагрузочной способности стандартного резинометаллического амортизатора АПС-2, параллельно которому и может быть размещён ГИТ на базе РКО. При необходимом увеличении приведённой массы при использовании амортизаторов с большей нагрузочной способностью, можно в качестве ГИТ использовать РКО рукавного типа, позволяющего получить большие отношения A/S и более высокие значения для $m_ж$ за счёт увеличения высоты инерционных трубок. Например, для РКО Н-609, габаритные размеры которой 290×275 мм, получается $A=472$ см², $S=2$ см², $h=15$ см. Тогда из (6) значение $m_{пр}=1670$ кг.

Для определения параметров опоры необходимо вычислить характеристики мембраны 4 (рис. 1).

Мембрану будем рассматривать как однородную круглую пластину постоянной толщины, жёстко защемлённую по краям, нагруженную равномерным давлением. Для предварительных расчётов примем линейную модель прогиба мембраны.

Статическая жёсткость c' всей опоры (рис. 1) равна

$$c' = F_{ст} / x_{ст} = c + c_м A^2 / S_м^{\,2}, \tag{10}$$

где $F_{ст}$ — статическая нагрузка; $x_{ст}$ — перемещение, вызываемое действием силы $F_{ст}$.

Для расчёта изгиба пластин вводится цилиндрическая жёсткость [5]

$$D_ц = \frac{E h_м^{\,3}}{12\left(1-\mu^2\right)}. \tag{11}$$

Здесь E — модуль Юнга; $h_м$ — толщина мембраны; μ — коэффициент Пуассона.

Максимальный прогиб мембраны w_0 в статике рассчитывается по выражению

$$w_0 = \frac{p R_м^4}{64 D_ц}, \tag{12}$$

где p — давление в рабочей камере; $R_м=D_м/2$ — радиус мембраны.

Давление p в рабочей камере при статической нагрузке равно

$$p = F_{ст} / A. \tag{13}$$

Объём жидкости, вытесняемый силой $F_{ст}$ из рабочей камеры, равен объёму V, который компенсирует мембрана:

$$A x_{ст} = V. \tag{14}$$

Объём V определяется по формуле [5]: $V=\pi R_м^{\,2} w_0/3$, тогда с учётом выражений (11)–(14) получим толщину мембраны $h_м$:

$$h_м = R_м^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi\, c'\left(1-\mu^2\right)}{16 E A^2}}\ . \tag{15}$$

Для виброизоляционной гидравлической опоры на базе РКО И-08: $A=28{,}4$ см². Механические характеристики резины, из которой изготовлена мембрана: $E=6$ МПа; $\mu=0{,}5$. В соответствии с рекомендациями, приведёнными в [1], коэффициент жёсткости мембраны должен составлять 0,05~0,1с.

По формуле (15) получим толщину мембраны $h_м=3{,}2$ мм. Принимаем $h=4$ мм.

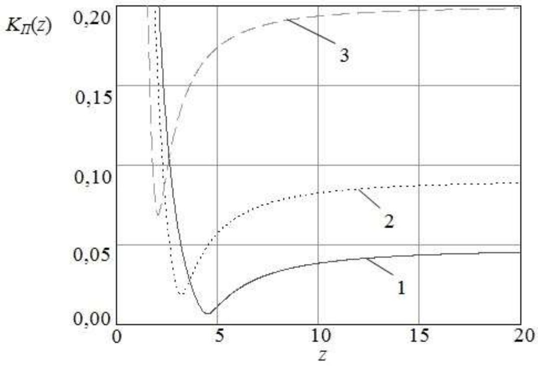


Рис. 3. Зависимость $K_П(z)$ для значения ν=0,05: 1 — при n=20; 2 — при n=10; 3 — при n=4

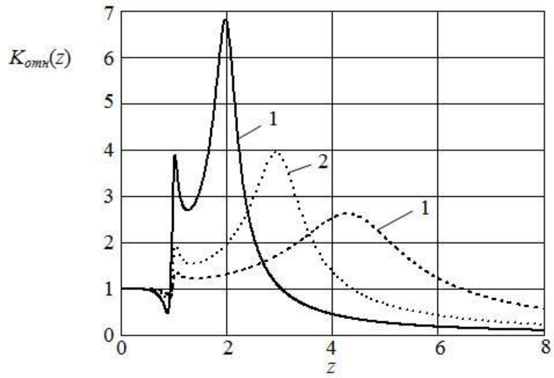


Рис. 4. Зависимость $K_{отн}(z)$ для значения ν=0,05: 1 — при n=4; 2 — при n=9; 3 — при n=20

Расчёты, проведённые по выражению (5), показывают, что использование ГИТ даёт уменьшение коэффициента передачи по силе в сравнении с опорой без него (рис. 3). На рис. 4 приведёт график отношения коэффициента передачи опоры без ГИТ и с ним $K_{отн}=K_0/K_П$ в зависимости от безразмерной частоты z. Он характеризует степень эффективности применения ГИТ. Из графика видно, что в достаточно широком диапазоне частот вблизи частоты настройки ГИТ $z=\sqrt{n}$ (или $\omega_н^{\,2}=c'/m_{пр}$) получается уменьшение коэффициента передачи в 2–4 раза. При этом эффективность возрастает в этом диапазоне частот с увеличением приведённой массы и с уменьшением демпфирования в опоре.

Таким образом, применение виброопоры с ГИТ позволяет существенно улучшить степень виброизоляции объёкта вблизи частоты настройки ГИТ.

Анализ выражения (9) показал, что по критерию минимального значения коэффициента виброизоляции $K_П$ во всём диапазоне частот, оптимальные значения n лежат в пределах 4–10, т.к. при малых n ухудшается виброизоляция на высоких частотах, а при больших n влияние инерционности в гидравлическом преобразователе движения мало и система с ГИТ приближается по свойствам к пассивным упругим виброизоляторам.

Предложенный в работе подход к оценке эффективности виброизоляционной опоры с ГИТ в зависимости от отношения $n=m_0/m_{пр}$ позволит осуществлять проектирование с учётом требований как по частоте настройки, так и по характеристикам упругого элемента и гидравлического инерционного трансформатора.

Например [6], применяемые для судовых двигателей пассивные виброизоляторы недостаточно эффективны на характерных частотах 16, 32 и 63 Гц. Легко видеть, что виброизолятор типа АПС с номинальной нагрузкой 3000 Н и собственной частотой колебаний 6 Гц в совокупности с ГИТ на базе РКО И-09 при $n=7$ будет иметь частоту настройки ~16 Гц, а обеспечить величину $m_{пр}=42,8$ кг путём выбора числа инерционных трубок не представляет принципиальных трудностей.

Библиографический список

1. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б. А. Гордеев [и др.]. — М. : ФизМатЛит, 2004. — 176 с.
2. Мугин, О. О. Экспериментальные исследования виброизолятора с преобразованием движения инерционных элементов / О. О. Мугин, А. В. Синёв // Вестник научно-технического развития. — М., 2012. — № 4 (56). — С. 24—31.
3. Расчётно-экспериментальные методы проектирования сложных резинокордных конструкций / И. А. Трибельский [и др.]. — Омск : ОмГТУ, 2011. — 240 с.
4. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики : в 2-х т. / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. — М. : Наука, 1983. — Т. 2. — 640 с.
5. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. — М. : Машиностроение, 1980. — 326 с.
6. Щербакова, О. В. Перспективные направления в виброизоляции / О. В. Щербаков, М. К. Романенко // Речной транспорт (XXI век). — 2010. — № 1. — С. 77—80.

БУРЬЯН Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой основ теории механики и автоматического управления.
Адрес для переписки: burian7@mail.ru
СОРОКИН Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры основ теории механики и автоматического управления.
СИЛКОВ Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры основ теории механики и автоматического управления.
ГАЛУЗА Юрий Фёдорович, аспирант кафедры основ теории механики и автоматического управления.
Адрес для переписки: yourchello@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.12.2014 г.

УДК 533.601.16

В. И. КУЗНЕЦОВ
О. А. ШАРИКОВ

Омский государственный технический университет

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ К ВАРИАНТУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА «ВИХРЕВОЙ ЭФФЕКТ КОНФУЗОРА»

Приводятся описание нового метода переработки механических смесей, использующего физический процесс «вихревой эффект конфузора» и вариант дифференциального уравнения движения частиц механической смеси в процессе вихревого эффекта конфузора.

Ключевые слова: вихревые потоки, сепаратор-конфузор, завихритель, тангенциальное сопло.

Описание нового технологического метода переработки механических смесей, использующего физический процесс «вихревой эффект конфузора», вариант дифференциального уравнения движения частиц механической смеси и некоторые свойства этого процесса являются содержанием данной статьи.

Для получения вихревого эффекта сепаратора-конфузора собирается технологическая схема, (рис. 1). Её работу можно описать следующим образом. Воздух от нагнетателя подаётся в завихритель, где формируется вихревой поток с осевыми и периферийными слоями [1]. В осевых слоях создаётся необходимое разряжение, куда засасывается обрабатываемая механическая смесь. Вихревой поток поступает в вихревую трубу, из неё — в сепаратор-конфузор, в котором происходит обособление из механической смеси частиц нужного компонента. Обособленные частицы по отводному каналу подаются в накопитель готовой продукции, а оставшаяся часть смеси через осевое отверстие в меньшем основании сепаратора-конфузора поступает на дальнейшую обработку.

Физический процесс «вихревой эффект конфузора» проявляется в том, что при движении

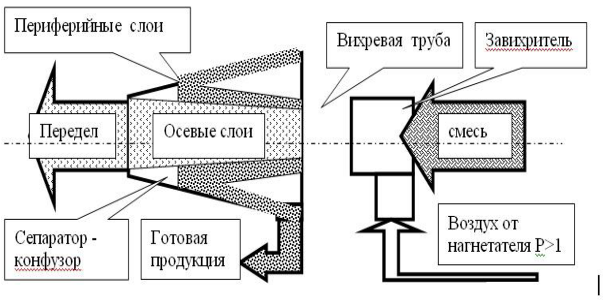


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема использования вихревого эффекта сепаратора-конфузора

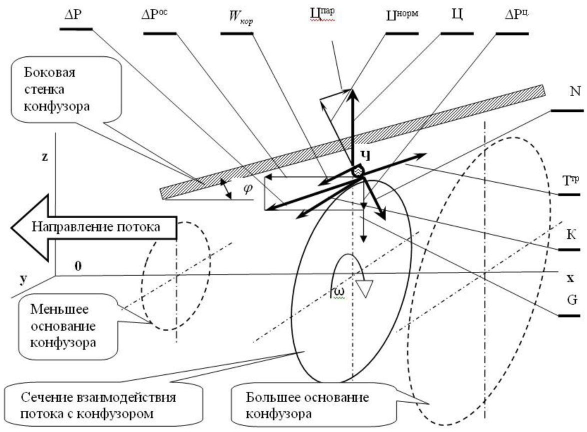


Рис. 2. Принципиальная схема взаимодействия сил в процессе вихревого эффекта конфузора

закрученного потока механической смеси веществ в рабочей зоне конического сепаратора-конфузора формируется встречный вихрь из частиц периферийного слоя поступившего закрученного потока [2]. В процессе движения потока по приближению к наклонной стенке конфузора частицы периферийного слоя, у которых скорость параллельна образующей конфузора, затормаживаются. Под влиянием возникающего перепада давления частицы меняют направление своего движения на направление, противоположное основному вихрю и через боковое отверстие в обечайке, возле большего основания конфузора, поступают в канал отвода обособленных частиц.

Вихревой эффект конфузора является физическим процессом, лежащим в основе нового комплексного метода переработки механических смесей и проектируемого для этого метода модульного вихревого технологического комплекса — МВТК.

Технологические процессы переработки механических смесей, например, сепарация, обусловливают рассматривать механические смеси как совокупность частиц, входящих в них компонентов. Каждую частицу вихревого потока механической смеси, в свою очередь, можно представлять как материальную точку с массой и иными физическими свойствами. Предметом исследования статьи является процесс на небольшом, но имеющем принципиальное значение для раскрытия сути вихревого эффекта конфузора, участке движения вихревого потока в конфузоре. Это участок движения потока по внутренней конической поверхности конфузора, от точки смачивания (касания) частицами потока стенки конфузора, до точки полного торможения в осевом продвижении этих частиц.

Вихревой поток движется по винтовой линии от большего основания в сторону меньшего основания конфузора. Внутренняя боковая поверхность конфузора является поверхностью связи для частиц периферийного слоя потока, превращающая частицы смеси в несвободные материальные точки. Дифференциальное уравнение движения несвободной материальной точки в векторной форме, с учётом основных сил, изображённых на (рис. 2), имеет следующее содержание:

$$m_{час} \star \overline{W} = -\overline{G} - \Delta\overline{P} - \overline{N} + \overline{T}^{тр} + \overline{K} - \overline{Ц} \qquad (1)$$

Рассмотрим члены этого уравнения. В левой части уравнения:

$m_{час}$ — масса частицы компонентов механической смеси, кг.

$\overline{W}$ — абсолютное ускорение частицы механической смеси, м/сек^2;

В правой части уравнения:

1. $\overline{G}_{час}$ — вес частицы, кг; определяемый по формуле: $\overline{G}_{час} = m_{час} \star g$;

$m_{час}$ — масса частицы, кг;

g — земное ускорение, кг$\star$м/сек^2;

2. $\Delta\overline{P}$ — сила перепада давления, действующая на частицу, Па.

Сила перепада давления (перепад давления) выражается формулой:

$$\Delta\overline{P} = \overline{P} - \overline{P}^1,$$

где: $\overline{P}$ — полное давление в периферийном слое потока, Па;

$\overline{P}^1$ — полное давление в замкнутом пространстве «Ф» конфузора, Па;

$\Delta\overline{P}$ — полное давление (перепад давления) во встречном потоке, Па.

Для раскрытия процесса возникновения перепада давления рассмотрим рис. 3. Известно, что давление в поперечном сечении вихревого потока изменяется — в периферийных слоях давление больше, в осевых слоях меньше. У точки касания потоком стенки — «Ч», в сечении взаимодействия

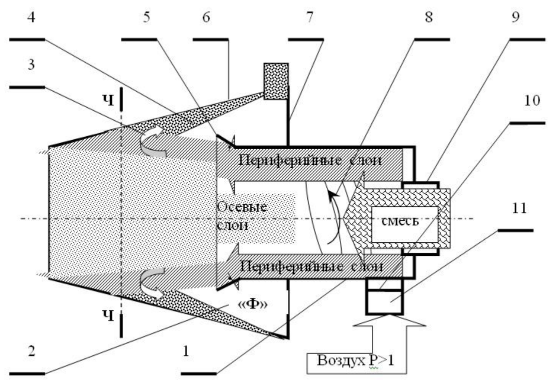


Рис. 3. Схема формирования перепада давления в процессе вихревого эффекта конфузора

1 — вихревая труба;
2 — свободная зона «Ф» конфузора, где давление P[1];
3 — периферийные слои потока, где давление «Р»;
4 — встречный поток из обособленных частиц периферийных слоёв;
5 — диффузор вихревой трубы;
6 — боковая стенка конфузора;
7 — задняя стенка конфузора в большем основании;
8 — вихревой поток смеси, сформированный в завихрителе;
9 — питатель, куда подаётся обрабатываемая смесь;
10 — завихритель;
11 — трубопровод от нагнетателя.

периферийного слоя потока со стенкой конфузора «Ч-Ч», где начинается торможение периферийных слоёв потока о стенку, происходит уплотнение частиц потока в периферийном слое, и давление в нём повышается дополнительно. Одновременно с этим в замкнутом пространстве конфузора, образованном задней стенкой конфузора в большем его основании, боковой стенкой, выступающей частью вихревой трубы и движущимся вихревым потоком, под действием эжекции от движущегося потока, формируется область пониженного давления, зона «Ф», в которой давление «Р[1]» значительно меньше давления «Р» в заторможённом, периферийном слое основного потока.

Повышение давления в заторможенном периферийном слое с одновременным понижением давления в замкнутом пространстве конфузора, зоне «Ф», приводит к «перепаду давления», «$\Delta\overline{P}$», в данной зоне, под влиянием которого частицы из периферийного слоя перемещаются в зону пониженного давления «Ф», формируя встречное основному потоку движение. Проекция силы перепада давления: ось «x»: $\Delta P_x = \Delta P^{oc} = -\Delta P\cos\varphi$;

ось «z»: $\Delta P_z = \Delta P^{ц} = -\Delta P\sin\varphi$; ось «y»: $P_y = 0$.

3. $\overline{N}$ — нормальная составляющая реакции стенки конфузора на давление частицы, на участке взаимодействия пограничных слоёв потока и стенки конфузора, кг/м². В проекциях на координатные оси эта сила будет иметь:

Ось «x» $N_x = +N\cdot\sin\varphi$; ось «y» $N_y = 0$; ось «z» $N_z = -N\cdot\cos\varphi$.

4. $\overline{T}_{тр}$ — сила трения частицы о стенку конфузора, кг.

В векторной форме закон Кулона—Амонтона имеет вид:

$$\overline{T}_{тр} = \gamma N\frac{\overline{v}}{v}.$$

Сила трения в проекциях на координатные оси:

$$\begin{cases} T_x^{\ тр} = \gamma\cdot N = \gamma\cdot N\cdot\dfrac{\overline{v}_x}{v} = \\ = \gamma\cdot N\cdot\dfrac{\dot{x}}{V_{абс}} = \gamma\cdot N\cdot\cos\varphi \\ T_z^{\ тр} = \gamma\cdot N = \gamma\cdot N\cdot\dfrac{\overline{v}_z}{v} = \\ = \gamma\cdot N\cdot\dfrac{\dot{z}}{V_{абс}} = -\gamma\cdot N\cdot\sin\varphi. \end{cases}$$

5. $\overline{K}$ — сила Кориолиса в конфузоре на участке взаимодействия периферийных слоёв потока со стенкой конфузора;

$$\overline{K} = m_{час}2\overline{\omega}_e\times\overline{V}_{рез}^{отн},$$

где $\overline{\omega}_e$ — угловая скорость переносного движения потока;

$\overline{V}_{рез}^{отн}$ — результирующая скорость относительного, поступательного движения потока, м\сек;

$m_{час}$ — масса частицы обрабатываемого материала, кг.

В скалярной форме это выразится так:

$$K = m_{час}\cdot 2\omega_e\cdot V_{рез}^{отн}\cdot\sin\varphi.$$

Проекции силы Кориолиса на координатные оси: ось «x»: $K_x = 0$; ось «z»: $K_z = 0$; ось «y»: $- K_y = K$, т.к. сила параллельна оси «y».

6. Центробежная сила «$\overline{Ц}$» определяется по формуле:

$$\overline{Ц} = \left(m_{час}\overline{a}\right) = +m_{час}\frac{\overline{V}_{окр}^{вращ2}}{r} = m_{час}\overline{\varpi}^2\overline{r}, \qquad \textbf{(2)}$$

$V_{окр}^{вращ}$ — окружная скорость частицы во вращательном движении, м/сек;

$\overline{a}$ — центробежное ускорение частицы, м/сек²;

$\overline{r}$ — радиус сечения взаимодействия, координата «z» или «y» точки «Ч».

Центробежная сила раскладывается на составляющие:

$\overline{Ц}^{норм}$ — нормальная составляющая центробежной силы.

$$Ц^{норм} = \frac{m_{час}\cdot\omega^2\cdot r}{\cos\varphi} =$$

$$= \frac{m_{час}\cdot\omega^2\cdot x\sin\varphi}{\cos\varphi} = m_{час}\omega^2 x tg\varphi.$$

$\overline{Ц}^{пар}$ — касательная составляющая центробежной силы, параллельная боковой стенке конфузора, т.е. образующей.

$$Ц^{пар} = m_{час}\omega^2\cdot r\cdot\sin\varphi =$$

$$= m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\cdot\sin\varphi = m_{час}\omega^2 x\sin^2\varphi.$$

Проекции нормальной составляющей центробежной силы « $\overline{Ц}^{норм}$ ».

«x»: $Ц_x^{норм} = -m_{час}\omega^2 x\sin^2\varphi\cos\varphi$;

«y»: $Ц_y^{норм} = 0$; «z»: $Ц_z^{норм} = m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\cos^2\varphi$.

Проекции касательной « $\overline{Ц}^{пар}$ » составляющей центробежной силы:

«x»: $Ц_x^{пар} = m_{час}\omega^2 x\sin^2\varphi\cos\varphi$;

«y»: $Ц_y^{пар} = 0$; «z»: $Ц_z^{пар} = m_{час}\omega^2 x\sin^2\varphi\cos\varphi$.

Таким образом, дифференциальные уравнения движения частицы:

ось «x»: $m\ddot{x}_x = -\Delta P_x - N_x - T_x^{тр} - Ц_x^{норм} + Ц_x^{пар}$

ось «y»: $m\ddot{y} = K_y = K = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi$

ось «z»: $m\ddot{z} = -G_z - \Delta P_z - N_z + T_z^{тр} -$

$$- Ц_x^{норм} + Ц_x^{пар} =$$

$$= -G_z - \Delta P_z - N_z + T_z^{тр} + Ц.$$

Уравнение поверхности прямого кругового конуса, которая для частиц является поверхностью связи, в каноническом виде записывается так:

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2} - \frac{x^2}{c^2} = 0, \qquad \textbf{(3)}$$

где a — полуоси сечения взаимодействия потока со стенкой конфузора;

c — расстояние от начала координат до сечения взаимодействия.

Продифференцируем уравнение конической поверхности дважды и добавим к дифференциальным уравнениям движения частицы:

$$m_{час}\ddot{x} = -\Delta P\cos\varphi + N\sin\varphi + N\gamma\cos\varphi \qquad \textbf{(4)}$$

$$m_{час}\ddot{y} = +m_{час}2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin$$

$$m_{час}\ddot{z} = -m_{час}g - \Delta P\sin\varphi -$$

$$- N\cos\varphi + N\gamma\sin\varphi + m_{час}\omega^2 x\sin\varphi$$

$$c^2 z\dot{z} + c^2 y\dot{y} - a^2 x\dot{x} = 0$$

$$a^2 z^2 + a^2 z\ddot{z} + a^2 y^2 + a^2 y\ddot{y} - c^2 x^2 - c^2 x\ddot{x} = 0.$$

В целях определения силы реакции стенки конфузора «N», рассмотрим граничный случай динамического равновесия частицы, т.е., когда нет перемещения частицы вперед или назад вдоль оси движения, оси «x», и нет перемещения в переносном вращательном движении, т.е. по оси «z». Выбираем третье уравнение системы (4), содержащее координаты «z» и «x».

$$\begin{aligned} m_{час}\ddot{z} &= -m_{час}g - \Delta P\sin\varphi - N\cos\varphi + N\gamma\sin\varphi + \\ &+ m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\cos^2\varphi + m_{час}\omega^2 x\sin^2\varphi\cos\varphi = \\ &= -m_{час}g - \Delta P\sin\varphi - N\cos\varphi + N\gamma\sin\varphi + 0 \end{aligned} \qquad \textbf{(15)}$$

Слагаемые второй части уравнения (5), каждое, равны нулю: «$(m_{час}\omega^2 x\cos^2\varphi\sin\varphi = 0); (m_{час}\omega^2 x\sin^2\varphi\cos\varphi = 0)$», так как множитель в их составе «$x=0$». Левая часть, этого же уравнения равна нулю, «$m_{час}\ddot{z} = 0$», так как «$\ddot{z} = 0$» при «$\dot{z} = const$», т.к. скорость переносного вращательного движения в этом сечении постоянная.

Тогда из оставшейся части уравнения (5) определяем силу давления на стенки конфузора — «N»:

$$\begin{aligned} 0 &= -m_{час}g - \Delta P\sin\varphi - N\cos\varphi + \\ &+ N\gamma\sin\varphi + 0 \Rightarrow N\gamma\sin\varphi - N\cos\varphi = \\ &= m_{час}g + \Delta P\sin\varphi \Rightarrow N(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi) = \\ &= m_{час}g + \Delta P\sin\varphi \Rightarrow N = \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} \end{aligned}$$

$$N = \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} \qquad \textbf{(6)}$$

Найденное значение подставляем в первое исходное уравнение системы (4) и производим упрощающие преобразования. В итоге получаем дифференциальное уравнение движения частицы вдоль оси «x»:

$$\begin{aligned} m_{час}\ddot{x} &= -\Delta P\cos\varphi + N\sin\varphi + N\gamma\cos\varphi = \\ &= -\Delta P\cos\varphi + \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}\sin\varphi + \\ &+ \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}\gamma\cos\varphi \Rightarrow \\ &\Rightarrow m_{час}\ddot{x} = \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}x \\ &x(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) - \Delta P\cos\varphi \end{aligned}$$

$$m_{час}\ddot{x} = \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) - \Delta P\cos\varphi. \qquad \textbf{(7)}$$

Упростим это выражение и перепишем для определения ускорения.

$$\begin{aligned} m_{час}\ddot{x} &= \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) - \Delta P\cos\varphi = \\ &\frac{(m_{час}g + \Delta P\sin\varphi)(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi)}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} - \\ &- \frac{\Delta P\cos\varphi(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} = \\ &= \frac{m_{час}g\sin\varphi + m_{час}g\gamma\cos\varphi + \Delta P\sin\varphi\sin\varphi + \Delta P\sin\varphi\gamma\cos\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} - \\ &- \frac{\Delta P\cos\varphi\gamma\sin\varphi - \Delta P\cos\varphi\cos\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} = \\ &= \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P(\sin^2\varphi + \cos\varphi^2)}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} = \\ &= \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P * 1}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{час}\ddot{x} &= \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P * 1}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ddot{x} = \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)m_{час}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ddot{x} - \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)m_{час}} = 0 \end{aligned}$$

Обозначим, для удобства записей, свободный член уравнения символом «Q». $Q = \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)m_{час}}$, тогда уравнение будет $\ddot{x} = Q$. **(8)**

В целях решения данного дифференциального уравнения методом понижения порядка с последующим разделением переменных, учитывая, что «$x=F(t)$», уравнение перепишем в удобном виде, проинтегрируем:

$$\begin{aligned} Q &= \ddot{x} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = Q \Rightarrow d\left(\frac{dx}{dt}\right) = Qdt \Rightarrow \\ &\Rightarrow \int d\left(\frac{dx}{dt}\right) = \int Qdt \Rightarrow \left(\frac{dx}{dt}\right) = Qt + C_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow d\dot{x} = (Qt + C_1)dt \Rightarrow \\ &\Rightarrow \int d\dot{x} = \int (Qt + C_1)dt \Rightarrow x = Q\frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2. \end{aligned}$$

Определяем постоянные интегрирования при начальных условиях, «$t=0$».

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{dx}{dt} = Qt + C_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)m_{час}} * t + C_1 \Rightarrow \dot{x}_0 = C_1 \\ \ddot{x} &= d\dot{x} = (Qt + C_1)dt \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ddot{x}_0 = Q\frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2 \Rightarrow \ddot{x}_0 = C_2. \end{aligned}$$

Если «$t=0$», то $\dot{x} = C_1 = \dot{x}_0$, где «$\dot{x}_0 = V_{0x}$» — проекция на ось «$x$» начальной скорости частицы, в момент касания стенки конфузора, а проекция на ось «x» ускорения этой же частицы в этой же точке будет «$\ddot{x}_0 = C_2 = W_x$». Это логически объяснимо, т.к. мы взяли участок из непрерывного процесса и частица входит в начало исследуемого участка движения потока, уже с имеющимися скоростью и ускорением. Делаем проверку.

$$\begin{aligned} x &= Q\frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{dx}{dt} = Q\frac{2t}{2}dt + C_1 t^0 + 0 \Rightarrow \dot{x} = Qdt + C_1 \\ \ddot{x} &= \frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{d}{dt}(Qdt + C_1) \Rightarrow \\ &\Rightarrow Q = \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)m_{час}} + 0. \end{aligned}$$

Правая часть уравнения тождественна с исходным уравнением (7). Решение верно. Производим подстановку найденных значений «N» в исходное уравнение движения, третье в системе (4) упростим:

$$\begin{aligned} m_{час}\ddot{z} &= -m_{час}g - \Delta P\sin\varphi - N\cos\varphi + \\ &+ N\gamma\sin\varphi + m_{час}\omega^2 x\sin\varphi \Longrightarrow \end{aligned}$$

$$m_{час}\ddot{z} = -m_{час}g - \Delta P\sin\varphi - \frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}\cos\varphi +$$

$$+\frac{m_{час}g + \Delta P\sin\varphi}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}\gamma\sin\varphi + m_{час}\omega^2 x\sin\varphi \Longrightarrow$$

$$\Rightarrow m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\gamma + \frac{m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\gamma)}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)} =$$

$$= m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\gamma\left(1 + \frac{1}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}\right).$$

После упрощающих преобразований получаем систему дифференциальных уравнений движения и поверхности частицы в конфузоре:

$$m_{час}\ddot{x} = \frac{m_{час}g(\sin\varphi + \gamma\cos\varphi) + \Delta P}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}$$

$$m_{час}\ddot{y} = +m_{час}2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi; \qquad \textbf{(9)}$$

$$m_{час}\ddot{z} = m_{час}\omega^2 x\sin\varphi\gamma\left(1 + \frac{1}{(\gamma\sin\varphi - \cos\varphi)}\right)$$

$$c^2 z\dot{z} + c^2 y\dot{y} - a^2 x\dot{x} = 0$$

$$a^2 z^2 + a^2 z\ddot{z} + a^2 y^2 + a^2 y\ddot{y} - c^2 x^2 - c^2 x\ddot{x} = 0.$$

Рассмотрим второе уравнение системы (4). Сократим в нём значение массы частицы «$m_{час}$» и запишем в иной форме производную:

$$m_{час}\ddot{y} = +m_{час}2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ddot{y} = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi \Rightarrow \frac{d^2y}{dt^2} = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi \Rightarrow$$

$$\ddot{y} = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi \Rightarrow \frac{d^2y}{dt^2} = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{dy}{dt}\right) = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi \Rightarrow$$

Разделим переменные и проинтегрируем дважды:

$$d\left(\frac{dy}{dt}\right) = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi dt = \int d\left(\frac{dy}{dt}\right) = \int 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(\frac{dy}{dt}\right) = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t + C_3 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{dy}{dt}\right) = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t + C_3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \int dy = \int\left(2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi\right)dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t + C_3 t + C_4.$$

$$При = t = 0, \Rightarrow y = 0; \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t = 0 \Rightarrow C_3 t = 0 \Rightarrow C_4 = 0.$$

Постоянная «C_3» определяется из начального условия, «$t_0 = 0$», при котором результирующая скорость в относительном поступательном движении — «$V_{рез}^{отн}$» равна нулю. В сечении «Ч-Ч» частица участвует в переносном вращательном движении, в котором проекциями скоростей на ось «у» будет одна — радиальная скорость во вращательном движении частицы «$V_{рад}^{вращ} = \dot{y}$». Делаем проверку.

$$y = \omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t^2 + C_3 t + C_4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{y} = (\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t^2 + V_{рад}^{вращ}t + 0)' dt \Rightarrow$$

$$\dot{y} = (2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t + V_{рад}^{вращ})dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ddot{y} = (2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi * t + V_{рад}^{вращ})' dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ddot{y} = 2\omega_e V_{рез}^{отн}\sin\varphi + 0.$$

$(V_{рад}^{вращ})' dt = 0$, т.к. при установившемся режиме работы, радиальная скорость вращательного движения величина постоянная во времени. Выражение «$\ddot{y}$» идентичное исходному выражению, значит, решение верное.

Выводы. Выполнен анализ движения частицы на небольшом, но принципиально важном участке движения вихревого потока в конфузоре; предложен вариант теоретического обоснования нового физического процесса — «вихревой эффект конфузора»; разработано дифференциальное уравнение движения частицы в этом процессе.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. И. Теория и расчёт эффекта Ранка / В. И. Кузнецов. — Омск : ОМГТУ, 1994. — 217с.

2. Пат. 2475310 РФ, С2. Способ разделения механических смесей на основе использования свойств вихревого потока и применения вихревого сепаратора - конфузора / В. И. Кузнецов, О. А. Шариков, М. О. Шариков ; патентообладатели Виктор Иванович Кузнецов, Олег Алексеевич Шариков, Марат Олегович Шариков. — № 2010131618/05 ; заявл. 27.07.2010 ; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.

КУЗНЕЦОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры авиа- и ракетостроения Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ШАРИКОВ Олег Алексеевич, заместитель директора ООО «НПО «Вихрь» при ОмГТУ.

Адрес для переписки: o_sharikov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2014 г.

УДК 533.601.16

В. И. КУЗНЕЦОВ
О. А. ШАРИКОВ

Омский государственный
технический университет

СПОСОБ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОЙСТВ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА КОНФУЗОРА

Описываются новый способ и экспериментальная модель нового вихревого сепаратора в форме конфузора, использующих свойства вихревого эффекта конфузора, предназначенных для перемещения и переработки механических смесей. Способом впервые создаются условия, позволяющие эффективно управлять вихревыми потоками, а именно: создавать, направлять, разделять, спрямлять и снова формировать закрученные потоки.

Ключевые слова: вихревые потоки, сепаратор-конфузор, завихритель, тангенциальное сопло.

Общими недостатками известных до сих пор способов, использующих вихревые потоки, являются: многоступенчатость физического процесса, на котором базируется предлагаемые способы; большие габариты оборудования; высокие затраты электроэнергии; сложность проектирования; уникальность подобного оборудования. К тому же как правило предназначается применять вихревое оборудование на одну операцию из технологического процесса. Эффективность использования свойств закрученного потока смеси повысилась бы значительно, если бы вихревые установки использовались комплексно, на группу технологических операций, или даже на весь процесс переработки смеси в целом.

Как вариант решения данной задачи предлагается рассматривать описываемый в статье способ. «Способ комплексной переработки механической смеси с использованием свойств вихревого сепаратора формы конфузора (сепаратор-конфузор)», предназначенный для переработки разнообразных механических смесей, в различных видах и формах их существования: жидкостном (смесь нефтепродуктов и воды), газообразном (выхлопные газы), сыпучем (пески, зерновой материал) и т.п.

Способ перемещения и переработки механических смесей применяется для загрузки механической смеси в оборудование и последующего транспортирования на технологические операции производственного процесса, переработки с максимально комплексным использованием энергии, однажды сообщенной механической смеси при формировании закрученного потока. Реализация способа осуществляется с помощью вихревого технологического оборудования, использующего «вихревой эффект конфузора». Суть этого эффекта заключается в следующем (рис. 1).

В процессе продвижения конфузоре закрученного потока, состоящего из периферийных и осевых слоёв, периферийные слои, приближаясь к наклонной стенке конфузора, затормаживаются и, при дальнейшем продвижении вперёд, прижимаются центробежными силами к внутренней стороне конической обечайки.

Под влиянием центробежной силы, а также, перепада давления, возникающего от действия сил сопротивления наклонной стенки, эжекции в пространстве ограниченном, задней стенкой в большем основании конфузора, боковой стенкой конфузора и струёй проходящего закрученного потока, заторможенные частицы меняют направление своего осевого движения в противоположном направлении.

Затем, по расширяющейся конической обечайке, продвигаются к большему основанию конфузора, через боковое отверстие в этой обечайке поступают в канал отвода плотных частиц сепаратора-конфузора.

Менее плотные частицы располагаются возле оси потока и продолжают движение вдоль оси, сохраняя первоначальное направление движения основного потока в сторону осевого отверстия в меньшем основании сепаратора-конфузора, через него попадают в сопло-диффузор и выводятся по осевому отводу менее плотных частиц компонентов смеси.

Таким образом, под воздействием центробежной силы и сил перепада давления в конфузоре в рабочей зоне сепаратора-конфузора формируется два закрученных потока: сохранивший первоначальное направление основного вихревого потока осевой поток из менее плотных частиц и встречный поступившему потоку вихрь из частиц периферийного слоя основного закрученного потока обрабатываемой механической смеси [2].

Благодаря этому процессу разделения на два противоположно направленных потока, так называемому «вихревому эффекту конфузора», создаются условия для обособления и последующего вывода из обрабатываемой смеси необходимых компонентов. Вихревой эффект конфузора раскрывает

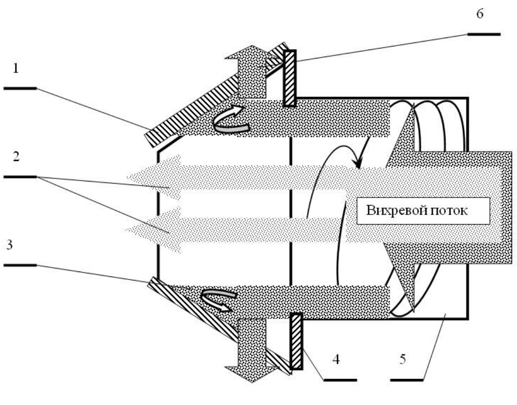


Рис. 1. Принципиальная схема физического процесса вихревого эффекта сепаратора-конфузора

1 — боковая стенка конфузора;
2 — осевые, менее плотные, слои закрученного потока;
3 — периферийные, более плотные, слои закрученного потока;
4 — задняя стенка конфузора;
5 — вихревая труба;
6 — отводной канал обособленных частиц.

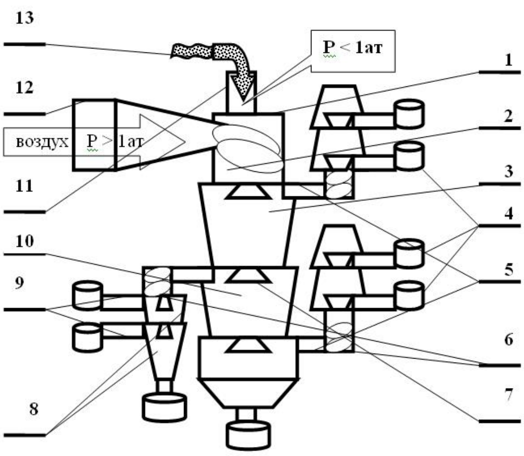


Рис. 2. Принципиальная схема технологического процесса в способе комплексной переработки механической смеси с использованием свойств вихревого сепаратора формы конфузора (сепаратор-конфузор)

1 — завихритель первого сепаратора-конфузора основной линии;
2 — вихревая труба основной линии;
3 — первый сепаратор-конфузор основной технологической линии;
4 — накопители технологических переделов и готовой продукции;
5 — отводы к завихрителям дополнительных технологических линий;
6 — завихрители дополнительных технологических линий;
7 — сопло-диффузор;
8 — сепараторы-конфузоры дополнительных технологических линий;
9 — путепроводы для межоперационного транспортирования переделов;
10 — второй сепаратор-конфузор основной технологической линии;
11 — путепровод с разряжением для загрузки технологического комплекса;
12 — путепровод от нагнетателя;
13 — механическая смесь, подлежащая переработке.

дополнительные преимущества вихревых технологий, позволяет по-новому взглянуть на них, сделать их реально управляемыми и эффективными.

Способ реализуется с применением вихревого технологического комплекса следующим образом (рис. 2). От компрессора (или иного нагнетателя — насоса, вентилятора и т.п.) воздух по путепроводу 12 подается в завихритель основной технологической линии 1. Воздух, попадая в завихритель 1, закручивается, отчего в завихрителе создается разряженное пространство, куда стекает и засасывается смесь 13 из загрузочного бункера или засасывается из бурта смеси через путепровод с разряжением для загрузки технологического комплекса 11, предназначенная для переработки смесь, например, зерновой материал. Закрученный поток механической смеси поступает в вихревую трубу 2, где под действием центробежных сил, сил массовых происходит его разделение на осевые и периферийные слои [1]. Затем состоящий из слоев вихревой поток смеси поступает в сопло-диффузор 7 и далее в разделительную зону первого сепаратора-конфузора основной технологической линии 3. При встрече вихревого потока с наклонной стенкой конфузора происходит торможение его периферийных слоёв и дальнейшее разделение потока: из плотных частиц периферийного слоя формируется встречный вихревой поток [2], согласно свойству «вихревого эффекта конфузора», описанному ранее, а остальная часть потока, осевые слои, продолжает вихревое движение вдоль оси в первоначальном направлении.

Встречный вихревой поток, из частиц периферийного слоя основного потока обрабатываемой механической смеси, под действием сил перепада давления в конфузоре, прижимаемый центробежными силами к стенке сепаратора-конфузора 3, движется вдоль расширяющейся этой стенки и поступает через отверстие в ней в канал отвода плотных частиц сепаратора-конфузора, а затем на дальнейшую обработку.

Осевые слои продолжают вихревое движение вдоль оси к центральному отверстию в меньшем основании конфузора 3. Они через сопло-диффузор 7, как центральному отверстию конфузора, поступают во второй сепаратор-конфузор основной технологической линии 10, т.е. во вторую ступень сепарации (или в накопитель 4 легких частиц, в зависимости от степени готовности передела).

В целях более полной переработки механической смеси используют дополнительные (вторая, третья, и т.д.) технологические линии переработки, в которые входит дополнительное оборудование (сепараторы-конфузоры, путепроводы и т.д.). Объединение основного и дополнительного оборудования в технологический комплекс возможно последовательным соединением входящих технологических звеньев и каскадным способом.

В случае последовательного соединения сепараторов-конфузоров создаётся основная технологическая линия с несколькими коническими обечайками, с отводами для плотных частиц.

Конические обечайки соединены между собой центральными осевыми отводами для менее плотных частиц последовательно, внахлестку, таким способом, что каждый большой торец последующей конической обечайки закрыт стенкой с центральным осевым отводом, диаметр которого соответствует диаметру посадочного места предыдущей конической обечайки. Последовательное соединение сепараторов-конфузоров в основной технологической линии, проиллюстрировано на (рис. 3). «Принципиальная схема последовательного соединения

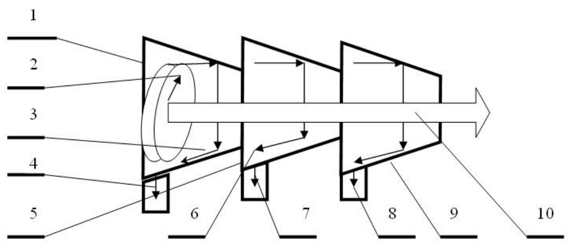


Рис. 3. Принципиальная схема последовательного соединения оборудования в способе комплексной переработки механической смеси с использованием свойств вихревого сепаратора формы конфузора (сепаратор-конфузор)

1 — первый основной сепаратор-конфузор (первая ступень);
2 — основной вихревой поток;
3 — встречный поток плотных частиц в основном сепараторе-конфузоре;
4 — обособленные плотные частицы периферийных слоёв первого основного сепаратора-конфузора;
5 — второй основной сепаратор-конфузор (вторая ступень);
6 — встречный поток частиц во втором основном сепараторе-конфузоре;
7 — обособленные частицы периферийных слоёв сепаратора-конфузора;
8 — плотные частицы периферийных слоёв j-го сепаратора-конфузора;
9 — очередной основной сепаратор-конфузор (j-я ступень);
10 — осевые слои вихря.

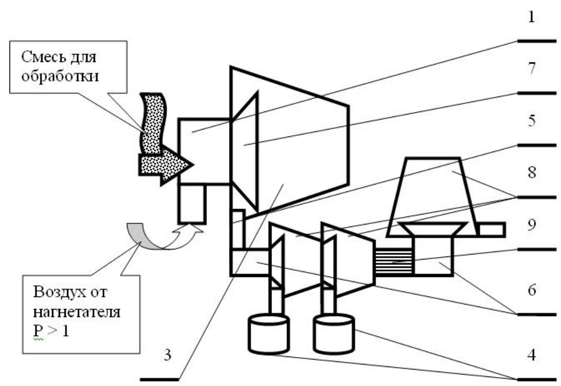


Рис. 4. Принципиальная схема каскадного соединения оборудования в способе комплексной переработки механической смеси с использованием свойств вихревого сепаратора формы конфузора (сепаратор-конфузор)
На данной схеме сохранена нумерация позиций, используемых в предыдущих схемах.

1 — завихритель первого сепаратора-конфузора основной линии;
3 —.первый сепаратор-конфузор основной линии;
4 — накопители технологических переделов и готовой продукции;
5 — отводы к завихрителям дополнительных технологических линий;
6 — завихрители дополнительных технологических линий;
7 — сопло-диффузор;
8 — сепараторы-конфузоры дополнительных технологических линий;
9 — отвод-выпрямитель к завихрителю дополнительной технологической линии.

оборудования в способе комплексной переработки механической смеси с использованием свойств вихревого сепаратора формы конфузора (сепаратор-конфузор)».

Для более глубокой обработки компонентов, обособленных ранее, в первых ступенях основной технологической линии переработки механической смеси используют так называемую каскадную технологическую схему соединения входящих модулей. Данная схема приводится на рис. 4. «Принципиальная схема каскадного соединения оборудования в способе комплексной переработки механической смеси с использованием свойств вихревого сепаратора формы конфузора (сепаратор-конфузор)». Изображена часть возможной схемы, именно первый основной сепаратор-конфузор с дополнительным оборудованием. Здесь необходимо выделять центральную, основную, технологическую линию сепараторов-конфузоров, соединённых последовательным способом, и дополнительные технологические линии. Дополнительные технологические линии могут присоединяться к конкретному основному сепаратору-конфузору с помощью отводов-путепроводов, располагаемых тангенциально к завихрителям дополнительных линий и могут, аналогично центральной, основной, технологической линии состоять из нескольких последовательных сепараторов-конфузоров.

Возможно, параллельное направлению потока механической смеси подключаемого конкретного сепаратора-конфузора расположение дополнительных технологических линий сепараторов-конфузоров и под необходимым, с точки зрения непрерывности производственного процесса, углом, в том числе прямым.

В последнем случае отвод-путепровод монтируют к центральному осевому отводу сепаратора-конфузора частиц менее плотных компонентов и, в качестве отводов-путепроводов, применяют выпрямители вихревого потока, представляющие из себя путепроводы многоугольного сечения.

Благодаря последовательной и каскадной технологическим схемам соединения звеньев комплекса и вихревому эффекту конфузора, впервые можно в широких пределах управлять вихревыми потоками, а именно:

— создавать закрученные потоки с необходимыми, для технологического процесса, параметрами;

— направлять вихревые потоки в необходимом количестве и направлении;

— разделять вихревые потоки по слоям и на входящие компоненты;

— спрямлять и снова формировать закрученные потоки.

Способ и устройство найдут эффективное применение практически во всех отраслях народного хозяйства, например:

1. Нефтепереработка

— очистка поверхностных водных и донных слоёв водоёмов от примесей нефти.

2. Переработка зерновых материалов

— очистка семенного материала от засорения и некондиционных семян.

Комплексная переработка зерна с шелушением, разделением, калибровкой.

3. Энергетическое производство

— очищение дымовых выбросов котельных ТЭЦ и локальных котельных от вредных примесей и т. д., перечень практически неограничен.

Способ будет эффективным средством в экологии, в области охраны окружающей среды.

Проект поддержан Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. И. Теория и расчёт эффекта Ранка / В. И. Кузнецов. — Омск : ОмГТУ, 1994. — 217 с.

2. Пат. 2475310 РФ, С2. Способ разделения механических смесей на основе использования свойств вихревого потока и применения вихревого сепаратора-конфузора / В. И. Кузнецов, О. А. Шариков, М. О. Шариков ; патентообладатели В. И. Кузнецов, О. А. Шариков, М. О. Шариков. — № 2010131618/05 ; заявл. 27.07.2010 ; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.

КУЗНЕЦОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры авиа- и ракетостроения Омского государственного технического университета (ОмГТУ).
ШАРИКОВ Олег Алексеевич, заместитель директора ООО «НПО «Вихрь» при ОмГТУ.
Адрес для переписки: o_sharikov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.12.2014 г.

УДК 621.91

А. Ю. ПОПОВ
Д. С. РЕЧЕНКО
А. Г. КИСЕЛЬ
Е. В. ЛЕОНТЬЕВА
М. Г. МАТВЕЕВА

Омский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СМАЗЫВАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖАРОПРОЧНОГО И ТИТАНОВОГО СПЛАВОВ

Титановые и жаропрочные сплавы применяется в авиастроении, преимущественно в двигателе самолета, и детали, выполненные из него, являются ответственными и высоконагруженными. Существенное значение при изготовлении деталей из этих материалов имеют лезвийные операции, предназначенные для получения высокого качества поверхности. При этом качество поверхности имеет очень высокие требования и жесткий допуск. Важным критерием показателя качества поверхности является шероховатость (микронеровности) и точность формы и размеров, образующихся при точении. Существенное значение при изготовлении деталей из титанового и жаропрочного сплавов имеют токарные операции, так как они занимают до 80 % всего технологического процесса изготовления деталей двигателя самолета. Качество обработанной поверхности имеет большое значение, так как деталям такого класса предъявляются высокие требования к точности изготовления.

Ключевые слова: маллообработка, лезвийная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость.

Проблемы, возникающие в процессе резания авиационных материалов, вызывают необходимость комплексного исследования процесса обработки с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), разработку методов определения эффективности СОЖ и методов подачи в зону резания, с учетом обрабатываемого материала, режимов обработки и режущего инструмента, с целью увеличения ресурса инструмента, производительности и точности обработки. Конечно, это вызывает дополнительные технологические трудности, так как существует большое количество видов и марок СОЖ. Учесть влияние всех факторов в комплексе можно, задавшись условиями ограничения.

Существующие взгляды сводятся к тому, что СОЖ в процессе резания оказывает смазывающее и охлаждающее, диспергирующее и моющее действия. В процессе резания металлов химически активные поверхности режущего инструмента и стружки входят в реакцию с компонентами смазочной среды. Данная гипотеза развивается специалистами по трению и резанию металлов.

Наибольший интерес влияния СОЖ вызывает обработка авиационных материалов, так как данная область наиболее востребована в повышении и сохранении качества обработки. В авиационных двигателях широко применяют сплавы ХН60ВТ (ВЖ98, ЭИ868), ХН50ВМТЮБ (ЭП648), ХН68ВМТЮК (ЭП693), ХН56ВМТЮ (ЭП199), ХН73МБТЮ (ЭИ698), ХН77ТЮР, ВТ8, ВТ3-1, ВТ9, ВТ8, ВТ8М, ВТ18У и т.д. [1–3]. В данной работе рассматривались жаропрочный сплав на никелевой основе ХН77ТЮР и титановый сплав ВТ3-1, являющиеся яркими представителями своих групп материалов.

В некоторых работах приводятся положения об отрицательном влиянии СОЖ на процесс резания, которое связано с особенностями образования пленки и ее проникающего действия. Механизм образования пленки и ее проникающее действие при резании остается предметом исследований. Проникновение СОЖ в клиновидный зазор между стружкой и поверхностью режущего инструмента происходит из-за капиллярного эффекта [4]. По некоторым данным при низких и средних скоростях обработки контакт стружки с резцом имеет точечный характер 0,5–1 мкм, что обеспечивает эффективное и постоянное поступление СОЖ и ее паров.

Проникающая способность СОЖ характеризуется толщиной пленки h и имеет зависимость:

$$h = \eta \frac{S \cdot V}{F},$$

где η — абсолютная вязкость масла, Н·с/м^2; S — площадь соприкосновения трущихся тел, м^2; V — скорость перемещения трущихся поверхностей, м/с; F — сила жидкостного трения, Н.

При этом должна соблюдаться закономерность:

$$h_{min} \geq 1{,}5 \cdot (\delta_1 + \delta_2),$$

где δ_1 и δ_2 — максимальные высоты выступов на поверхностях трения, обеспечивающие устойчивое и надежное жидкостное трение.

При высоких скоростях обработки, контакт стружки с резцом имеет сплошной характер, поэтому проникновение СОЖ возможно лишь в парообразном состоянии или при значительном давлении струи.

Проникающее действие СОЖ зависит от ее физических свойств (вязкость, плотность, химическая активность и т.д.) и от способа подвода ее в зону резания (рис. 1). По последним исследованиям установлено, что эффективность смазывающего действия усиливается при подаче СОЖ под давлением, так как это повышает проникающую способность струи или жидкости в распыленном состоянии. Значительное повышение давление свыше 10 бар позволяет производить эффективное стружкодробление и ее отвод.

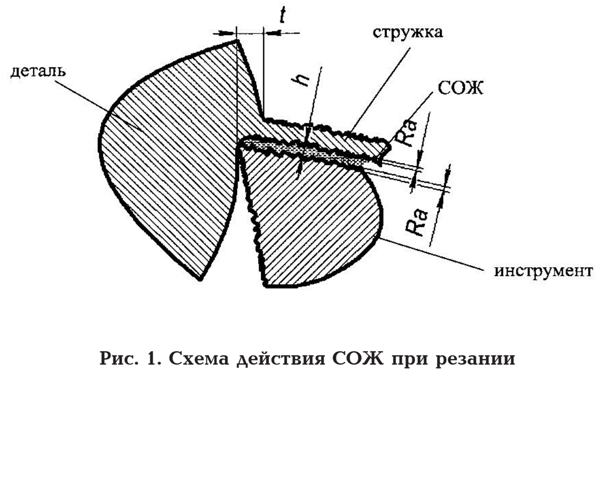


Рис. 1. Схема действия СОЖ при резании

По некоторым данным, проникающая способность зависит от размера молекул СОЖ. Молекулы олеиновой кислоты имеют длину органической цепи 19 Å, а молекулы таких соединений, как H_2S, SO_2, ClO_3, CCl_4, имеют длину связей атомов 1,5–2 Å, вследствие чего являются более эффективными [4].

Общие представления влияния СОЖ на процесс резания сводятся к тому, что в некоторых зонах происходит искажение кристаллической решетки обрабатываемого материала, за счет его охрупчения вследствие резкого перепада температур. При этом возникает и смазывающее действие за счет образования защитных пленок. Конечным проявлением смазывающего действия является уменьшение работы сил трения и повышение стойкости режущего инструмента.

Исследование толщины пленки проводились на машине трения ИИ5011.

Для проведения исследований применялись следующие марки СОЖ:

1) водоэмульсионные СОЖ с концентрацией 10 % марок: Смальта-3, Смальта-3*ЕР, Смальта ЕР, Биосил М, Addinol WH430, Blasocut 2000, Blasocut 4000, Emulcut 100, Росойл-500, Укринол-1М, Аквол-6, Mobilcut 140 и 1,5 % водный раствор кальцинированной соды (1,5 % в.р.к.с.);

2) синтетические СОЖ с концентрацией 10 % марок: Биосил С, Экол-3, Isogrind-130ЕР, Акремон-Д-1, Конкрепол-ВЦ, а также полусинтетическая СОЖ Смальта-11;

3) масляные СОЖ, масла и основы масляных СОЖ: жидкий парафин (Ж.П.), РЖ8У, ПС-28, И-40А, И-20А, И-12А, И-5А, Льняное масло, Масло Б-3В, Г.К., МР-1У, МР-3, МР-7, МБХ-5, Полигликоль, Эфир Т.

Ниже приведены зависимости толщины смазочной пленки h от кинематической вязкости СОЖ μ и зависимости коэффициента трения $K_{тр}$ от толщины смазочной пленки h для пар трения ХН77ТЮР – ВК8 (рис. 2, 3) и ВТ3-1 – ВК8 (рис. 4, 5).

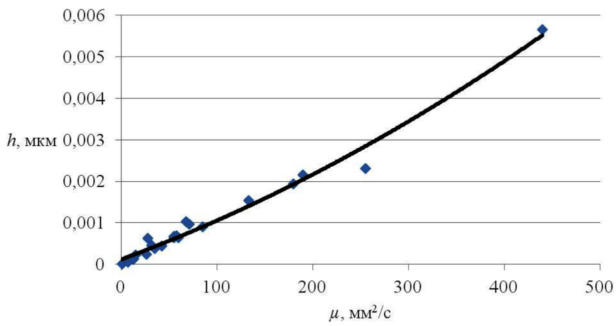


Рис. 2. Зависимость толщины смазочной пленки от кинематической вязкости СОЖ для пары трения ХН77ТЮР – ВК8

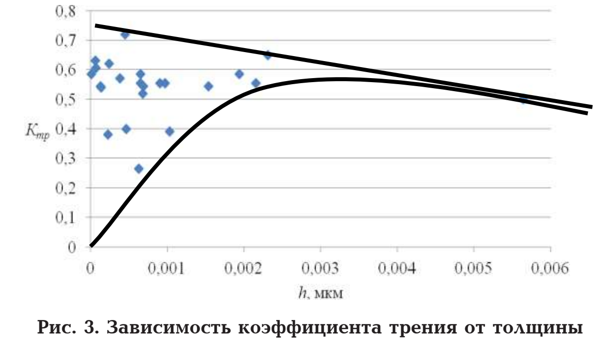


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от толщины смазочной пленки для пары трения ХН77ТЮР – ВК8

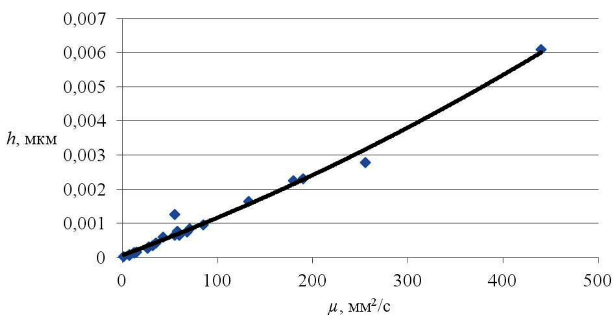


Рис. 4. Зависимость толщины смазочной пленки от кинематической вязкости СОЖ для пары трения ВТ3-1 – ВК8

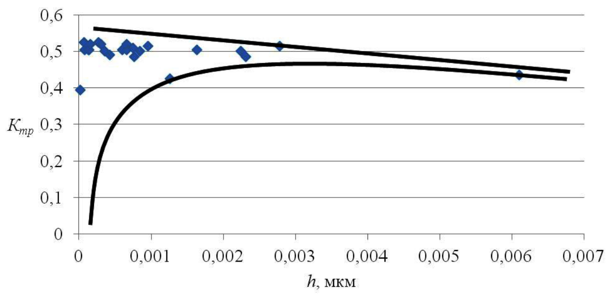


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от толщины смазочной пленки для пары трения ВТ3-1 – ВК8

Зависимость толщины смазочной пленки от кинематической вязкости СОЖ для пары трения ХН77ТЮР – ВК8 имеет вид:

$h = 9{\cdot}10^{-9}{\cdot}\mu^2 + 10^{-5}{\cdot}\mu$, при достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}977$.

Зависимость толщины смазочной пленки от кинематической вязкости СОЖ для пары трения ВТ3-1 – ВК8 имеет вид:

$h = 7{\cdot}10^{-9}{\cdot}\mu^2 + 10^{-5}{\cdot}\mu + 7{\cdot}10^{-5}$, при достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}985$.

Как видно из представленных зависимостей, с увеличением кинематической вязкости увеличивается толщина смазочной пленки и уменьшается коэффициент трения. На зависимостях коэффициента трения от толщины смазочной пленки показана ограниченная область, показывающая диапазон изменения коэффициента трения от толщины смазочной пленки. Как видно из зависимостей, с увеличением смазочного слоя до 0,002 мкм и более диапазон коэффициентов трения значительно сужается, что говорит о большей стабильности работы пар трения.

Библиографический список

1. Химушин, Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушин. – М. : Металлургия, 1969. – 750 с.
2. Колачев, Б. А. Титановые сплавы разных стран : справ. / Б. А. Колачев, И. С. Полькин, В. Д. Талалаев. – М. : ВИЛС, 2000. – 316 с.
3. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справ. / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М. : ВИЛС МАТИ, 2009. – 520 с.
4. Латышев, В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. – М. : Машиностроение, 1975. – 89 с.

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой металлорежущих станков и инструментов.
Адрес для переписки: popov_a_u@list.ru
РЕЧЕНКО Денис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов.
Адрес для переписки: rechenko-denis@mail.ru
КИСЕЛЬ Антон Геннадьевич, ассистент кафедры металлорежущих станков и инструментов.
Адрес для переписки: kisel1988@mail.ru
ЛЕОНТЬЕВА Екатерина Валерьевна, инженер 1-й категории кафедры машиноведения; магистрант гр. ПЭН-514 факультета элитного образования и магистратуры.
Адрес для переписки: katyleo@bk.ru
МАТВЕЕВА Марина Геннадиевна, заведующая лабораториями кафедры машиноведения; магистрант гр. ПЭН-514 факультета элитного образования и магистратуры.
Адрес для переписки: marina-matveeva-71@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2014 г.

Книжная полка

621.1/Г15

Галдин, В. Д. Газодинамика влажно-паровых турбин : учеб. пособие / В. Д. Галдин. – Омск : ОмГТУ, 2014. – 111 с. – ISBN 978-5-8149-1847-5.

Приведены схемы применения турборасширительных машин для работы на парогазовой смеси. Рассмотрены основные особенности работы турбинной ступени на двухфазном потоке с жидкими и твердыми частицами, виды эрозии деталей паровых турбин и методы борьбы с ней, элементы теории получения твердого диоксида углерода из продуктов сгорания топлива, расширяющихся в турбодетандере. Выполнено математическое моделирование и дан расчетно-теоретический анализ вымораживания диоксида углерода из потока газовой смеси. Установлены особенности течения воздуха, водорода, гелия и влажного воздуха в проточной части турбодетандера. Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 140100.68 «Теплоэнергетика и теплотехника».