

УДК 534.12+534-14

Моделирование методом вихревых элементов динамики цилиндрической оболочки в пространственном потоке жидкости*

А.В. Ермаков, Г.А. Щеглов

Представлена новая модификация алгоритма решения сопряженных задач аэрогидроупругости, позволяющая учесть взаимовлияние колебаний обтекаемой поверхности и процессов образования завихренности вблизи нее в области течения. До настоящего времени влияние данного фактора на условия аэрогидродинамического нагружения как правило учитывается при помощи полумпирических моделей. Проектирование тонкостенных конструкций, взаимодействующих с потоком, требует совершенствования методик расчета. В предлагаемом алгоритме параметры потока и гидродинамические нагрузки рассчитываются с использованием бессеточного лагранжевого метода вихревых элементов. Динамика оболочки моделируется методом разложения по собственным формам колебаний. Рассматривается модельная задача, в которой цилиндрическая оболочка малого удлинения, заделанная на краях, взаимодействует с пространственным потоком несжимаемой среды. Показано хорошее совпадение результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными. Проанализированы спектры частот вынуждающей гидродинамической нагрузки, действующей на жесткий цилиндр и оболочки разной жесткости. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что податливость обтекаемой поверхности оказывает существенное влияние на спектр нормальной силы.

Ключевые слова: метод вихревых элементов, несжимаемая среда, завихренность, разложение по собственным формам, аэрогидроупругость, цилиндрическая оболочка, спектр частот, пространственный поток.

The application of the three-dimensional vortex element method to the fluid dynamic analysis of cylindrical shell elements

A.V. Ermakov, G.A. Shcheglov

A new algorithm for solving coupled aerohydroelasticity problems is presented. The algorithm takes into account the mutual influence between surface vibrations and the vorticity formation in the flow around the surface. This phenomenon is currently described by empirical models. The design of thin-walled structures interacting with a flow requires improved calculation methods. The

*Авторы благодарят центр компетенций компании MSC Software в МГТУ им. Н.Э. Баумана за предоставленные лицензии на программное обеспечение и ценные консультации. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ Проект №11-08-00699-а.



ЕРМАКОВ
Андрей Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ERMAKOV
Andrey Vasil'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ЩЕГЛОВ
Георгий Александрович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

SHCHEGLOV
Georgiy Aleksandrovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

proposed algorithm implies that the flow parameters and hydrodynamic loads are calculated using the meshfree Lagrangian vortex element method. The dynamics of a shell is modeled by an expansion in terms of natural vibration modes. In a model problem under consideration, a cylindrical shell of small elongation is fixed at the edges and interacts with a three-dimensional incompressible flow. The results of simulation are in good agreement with experimental data. The frequency spectra of the hydrodynamic load acting on a rigid cylinder and shells of different stiffness are analyzed. The results of research confirm that the flexibility of a rigid surface significantly influences the spectrum of a normal force.

Keywords: vortex element method, incompressible medium, vorticity, expansion in terms of natural vibration modes, aerohydroelasticity, cylindrical shell, frequency spectrum, three-dimensional flux.

В настоящее время при проектировании конструкций, элементы которых взаимодействуют с потоком жидкости или дозвуковым потоком газа, актуальной задачей является уточнение математических моделей нестационарных нагрузок, действующих на конструкцию со стороны потока. В частности, подобная задача возникает при определении ветровых нагрузок, действующих на ракету-носитель космического назначения, установленную на стартовом комплексе. Анализ работ по этой теме, например [1], показывает, что современные математические модели нагрузок основаны на результатах экспериментального исследования абсолютно жестких моделей конструкций.

В случае, когда необходимо учитывать упругость конструкции недостаточно определить абсолютные величины нагрузок. Важнейшей задачей является расчет частотных характеристик нестационарной вынуждающей нагрузки для предотвращения резонансов и автоколебаний. Известно, что причиной значительных по амплитуде пульсаций аэрогидродинамических нагрузок для плохообтекаемых упругих тел служат процессы отрыва потока и вихреобразования в жидкости. При расчете ветровых нагрузок, обусловленных сходом вихрей, чаще всего используют модель вихрей Кармана — обтекаемое тело заменяют эквивалентным цилиндром и считают, что боковая нагрузка является моногармонической с безразмерной частотой порядка

$Sh \approx 0,2$ [2]. Такая упрощенная модель подходит для изучения динамики конструкций, обладающих высокой жесткостью. Однако у современных ракет-носителей, имеющих в составе податливые оболочечные элементы, обтекаемые потоком, низшие собственные частоты колебаний близки к частоте схода вихрей [3, 4]. В этом случае неучет податливости обтекаемой поверхности при расчете ветровых нагрузок может привести к принципиально неверным результатам.

Как показано в работе [5] в случае плоскопараллельного обтекания упругодеформируемого профиля потоком несжимаемой среды малые колебания обтекаемой поверхности могут существенно влиять на процессы вихреобразования и, как следствие, на величину и спектр нагрузок.

Целью настоящей работы является исследование аэроупругих колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки при пространственном обтекании. В отличие от проведенных ранее исследований, например [6, 7, 8], для расчета нестационарной нагрузки, вызываемой действием потока, используется численный метод вихревых элементов, что позволяет решить сопряженную задачу.

Описание модельной задачи и метода ее решения. Рассматривается цилиндрическая оболочка диаметром D , длиной L , толщиной стенки s , находящаяся в безграничном потоке несжимаемой среды, имеющем постоянную скорость. Вектор V_∞ скорости потока сонаправлен с осью OX неподвижной системы координат и имеет модуль V_∞ . Оболочка заделана с торцов. Торцевые поверхности считаются абсолютно жесткими и также обтекаются потоком. Ось оболочки совпадает с осью OZ неподвижной системы координат. Материал оболочки характеризуется модулем упругости E , коэффициентом Пуассона μ и плотностью γ . Среда имеет плотность ρ_∞ . Вязкость среды считается малой, что позволяет учитывать ее только как фактор, вызывающий генерацию завихренности на обтекаемой поверхности, а в потоке рассматривать среду как идеальную.

Математическая модель включает уравнения малых колебаний цилиндрической оболочки, заделанной по краям, уравнение неразрывности и уравнение сохранения импульса среды с граничным условием прилипания на обтекае-

мой поверхности и граничным условием отсутствия возмущений на бесконечном удалении от тела. В начальный момент времени среда и оболочка находятся в состоянии покоя. Затем в течение заданного промежутка времени ΔT среда разгоняется до скорости V_∞ и далее скорость потока не изменяется. Связь уравнений динамики оболочки и динамики среды обусловлена равенством скорости потока и скорости точек среды на обтекаемой поверхности, испытывающей деформации под действием нестационарного поля давления среды.

Система уравнений решается численно. Уравнения гидродинамики решаются бессеточным лагранжевым методом вихревых элементов (ВЭ) [9]. В качестве ВЭ применяются симметричные вихроны-отрезки. Для удовлетворения граничных условий на поверхности оболочки используются вихронные рамки, интенсивность которых определяется из условия равенства нормальных компонент скорости среды и обтекаемой поверхности в контрольной точке. Далее, согласно модели потока завихренности Лайтхилла–Чорина, на всей поверхности обтекаемого тела на основе рамок производится генерация вихревых элементов. Движущиеся в потоке ВЭ формируют вихревой след, влияние которого изменяет условия обтекания оболочки. Восстановление поля давления на обтекаемой поверхности по полю скоростей среды осуществляется при помощи аналога интеграла Коши–Лагранжа. Интегрирование уравнений динамики ВЭ производится методом первого порядка с шагом Δt .

Уравнение динамики оболочки методом разложения по собственным формам колебаний приводится к системе из q обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных обобщенных координат φ_k :

$$\{\ddot{\varphi}\} + n[\omega]_{\text{diag}} \{\dot{\varphi}\} + [\omega^2]_{\text{diag}} \{\varphi\} = \{f\}, \quad (1)$$

где $\{\varphi\}$ — вектор обобщенных координат; $[\omega]_{\text{diag}}$, $[\omega^2]_{\text{diag}}$ — диагональные матрицы собственных частот и их квадратов соответственно; n —

заданный декремент колебаний; $\{f\}$ — вектор обобщенных сил. Начальные условия для системы (1) нулевые.

Матрицы собственных частот $[\omega]_{\text{diag}}$ и форм колебаний $[A]$ определяются методом конечных элементов в коммерческом пакете MSC Nastran с помощью решателя SOL103. Дискретизация оболочки, необходимая для решения задачи методом конечных элементов и методом вихревых элементов проводится согласованно: в препроцессоре Patran геометрическая модель оболочки разбивается на четырехугольные оболочечные конечные элементы QUAD4. Узлы этих элементов используются для построения панелей обтекаемой поверхности и вихронных рамок в методе вихревых элементов. В результате динамика оболочки может быть описана перемещениями узлов панелей в декартовой неподвижной системе координат с использованием матрицы собственных форм и обобщенных координат в виде $\{u\} = [A]\{\varphi\}$. Вектор обобщенных сил определяется по вектору приведенных к узлам панелей сосредоточенных гидродинамических нагрузок $\{F_G\}$: $\{f\} = [A]^T \{F_G\}$.

Алгоритм численного решения задачи содержит две взаимосвязанные подсистемы — упругую и гидродинамическую. Расчет производится до достижения заданного конечного времени счета $t_k = \Delta t N$, где N — число шагов интегрирования.

На каждом i -м шаге алгоритма сначала методом вихревых элементов выполняется удовлетворение граничных условий в контрольных точках панелей, осуществляется генерация ВЭ и рассчитывается поле давлений в контрольных точках панелей. Затем гидродинамические нагрузки приводятся к сосредоточенным силам в узлах $\{F_G\}$ и вычисляются обобщенные силы $\{f\}$ для системы уравнений динамики (1).

Считается, что обобщенные силы на шаге интегрирования Δt остаются постоянными. Это позволяет найти решение (1) аналитически и определить обобщенные координаты для $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ в виде

$$\begin{aligned} \varphi_k(t_{i+1}) &= \frac{f_k}{\omega_k^2} + \frac{\exp(-n\omega_k \Delta t)}{\omega_k^2 \sqrt{1-n^2}} \times \\ &\times \left\{ \left[\omega_k^2 \sqrt{1-n^2} \varphi_k(t_i) - f_k \right] \cos(\omega_k \sqrt{1-n^2} \Delta t) + \right. \\ &+ \left. \left[\omega_k \dot{\varphi}_k(t_i) + n(\omega_k^2 \varphi_k(t_i) - f_k) \right] \sin(\omega_k \sqrt{1-n^2} \Delta t) \right\}; \\ \dot{\varphi}_k(t_{i+1}) &= \frac{\exp(-n\omega_k \Delta t)}{\sqrt{1-n^2}} \times \\ &\times \left\{ \left[\sqrt{1-n^2} \varphi_k(t_i) \right] \cos(\omega_k \sqrt{1-n^2} \Delta t) + \right. \\ &+ \left. \left[\frac{f_k}{\omega_k} - (n\dot{\varphi}_k(t_i) + \omega_k \varphi_k(t_i)) \right] \sin(\omega_k \sqrt{1-n^2} \Delta t) \right\}, \\ k &= 1, \dots, q, \quad i = 0, \dots, (N-1). \end{aligned}$$

Восстановленные по известным обобщенным координатам перемещения узлов $\{u\}$ позволяют построить деформированную обтекаемую поверхность и найти скорости поверхности в контрольных точках. Далее с учетом деформации поверхности производится интегрирование уравнений динамики ВЭ и осуществляется переход к следующему шагу.

Полученные результаты. Для оценки адекватности разработанного алгоритма и программного обеспечения проводилось сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [10]. В эксперименте стальная цилиндрическая оболочка, размещенная на движущейся тележке, помещалась в воду. Геометрические и упругие характеристики оболочки в расчетной схеме принимались следующими: диаметр оболочки $D = 0,1156$ м, длина оболочки $L = 0,512$ м, толщина оболочки $s = 0,0003$ м, модуль упругости $E = 1,98 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,31$, плотность материала оболочки $\gamma = 7920$ кг / м³,

плотность среды $\rho_\infty = 1000$ кг / м³, декремент колебаний $n = 0,05$.

Для решения задачи в коммерческом пакете MSC Patran была создана расчетная схема оболочки с общим числом панелей, равным 1400 (40 панелей в окружном направлении, 32 панели по образующей соответственно, 120 панелей на торцах оболочки).

Для метода вихревых элементов основные параметры расчетной схемы были выбраны следующими: радиус ВЭ $\varepsilon = 0,004$ м, расстояние от панели до рождающегося ВЭ $\delta = 0,004$ м.

Расчеты проводились для двух значений модуля скорости набегающего потока среды: $V_\infty = 0,9$ м / с, что соответствовало в эксперименте докритическому режиму обтекания оболочки и $V_\infty = 4,0$ м / с, что соответствовало в эксперименте закритическому режиму обтекания оболочки. Шаг времени для первого значения модуля составил $\Delta t = 0,008$ с, а для второго — $\Delta t = 0,001$ с.

Поскольку в работе [10] распределение коэффициента давления по окружности цилиндра вычислялось на основе эмпирических зависимостей, полученных в работе [11], в первой тестовой задаче методом вихревых элементов были определены распределения коэффициента давления по поверхности жесткого цилиндра. Полученные расчетным путем значения коэффициента давления C_p для рассмотренных скоростей набегающего потока, осредненные по 800 шагам интегрирования, представлены на рис. 1. Следует отметить хорошее совпадение полученных значений с данными, представленными в работе [11]. При расчете обтекания абсолютно жесткого цилиндра частота схода вих-

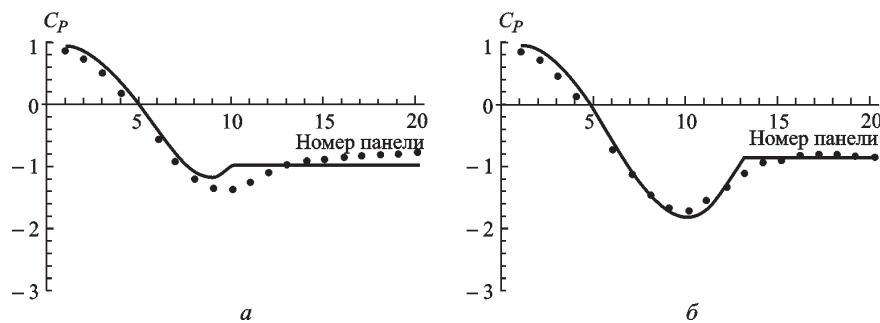


Рис. 1. Усредненное значение C_p для абсолютно жесткого цилиндра (•••) в сравнении с экспериментом [11] (—):
а — $V_\infty = 0,9$ м / с; б — $V_\infty = 4,0$ м / с

рей составила $\Omega = 1,32$ Гц, что соответствует безразмерной частоте $Sh = \Omega D / V_\infty \approx 0,17$.

Во второй тестовой задаче были рассчитаны переходные режимы взаимодействия упругих оболочек с набегающим потоком. В MSC Nastran были рассчитаны частоты и формы колебаний оболочки. Низшая собственная частота колебаний оболочки составила $\omega_1 = 399,3$ Гц. Из сравнения результатов методических расчетов с экспериментом было установлено, что минимально необходимым является число удерживаемых форм $q = 48$. Высшая собственная частота колебаний составила $\omega_n = 1\,550,4$ Гц.

Поскольку в работе [10] кривые прогибов оболочки даны в безразмерном виде, для идентификации абсолютных значений прогибов использовались результаты расчета методом конечных элементов задачи статики оболочки, нагруженной давлением, распределенным в соответствии с эпюрой C_p [11]. Результат расчета для двух значений V_∞ представлен на рис. 2. Эпюры прогибов среднего сечения оболочки, полученные в эксперименте (показаны на рис. двумя круговыми маркерами), были совмещены с эпюрой прогибов из статического расчета по прогибу в передней точке среднего сечения. Сравнение вида деформированного среднего сечения, полученного путем осреднения по 1 000 шагам интегрирования прогибов, найденных в результате решения сопряженной задачи (линии на рис. 2), показывает

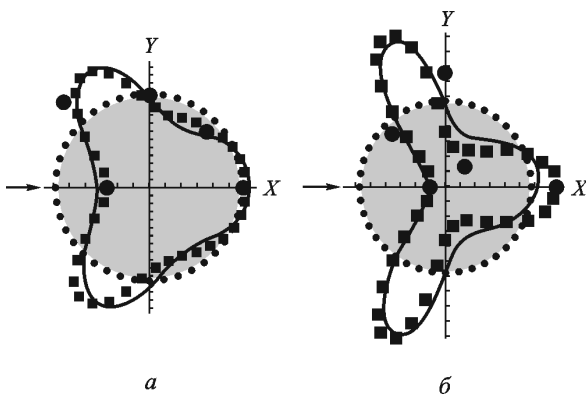


Рис. 2. Эпюры прогибов среднего сечения оболочки:

a — $V_\infty = 0,9$ м/с; *б* — $V_\infty = 4,0$ м/с;

- — исходное сечение; ■■■ — статический расчет;
- — эксперимент [11]; - - - осредненное решение сопряженной задачи

хорошее совпадение с результатами эксперимента и решением задачи статики.

Для оценки влияния податливости обтекаемой поверхности на нестационарное нагружение оболочки был рассчитан переходный режим длительностью $t_k = 8,0$ с при $V_\infty = 0,9$ м/с с уменьшенной толщиной оболочки $s = 0,00009$ м. Чтобы под действием потока эта оболочка не потеряла устойчивость плотность среды принималась равной $\rho_\infty = 100$ кг/м³. Получена низшая собственная частота колебаний оболочки $\omega_1 = 15,7$ Гц, что на порядок больше частоты схода вихрей Кармана. Высшая собственная частота колебаний составила $\omega_{48} = 54,5$ Гц. Анализ спектров перемещений узлов панелей показал, что при взаимодействии оболочки с потоком в основном возникают колебания по 3–6-й собственным формам. Пример вида деформированной оболочки для момента времени $t = 3,4$ с показан на рис. 3.

Из анализа коэффициентов нестационарных гидродинамических нагрузок, отнесенных к площади продольного сечения $\sigma = DL$, для трех рассмотренных случаев обтекания потоком при $V_\infty = 0,9$ м/с абсолютно жесткого цилиндра, жесткой ($\omega_1 = 399,3$ Гц) и податливой ($\omega_1 = 15,7$ Гц) оболочки следует, что коэффициент продольной силы в трех указанных случаях не изменяется и остается практически стационарным, рав-

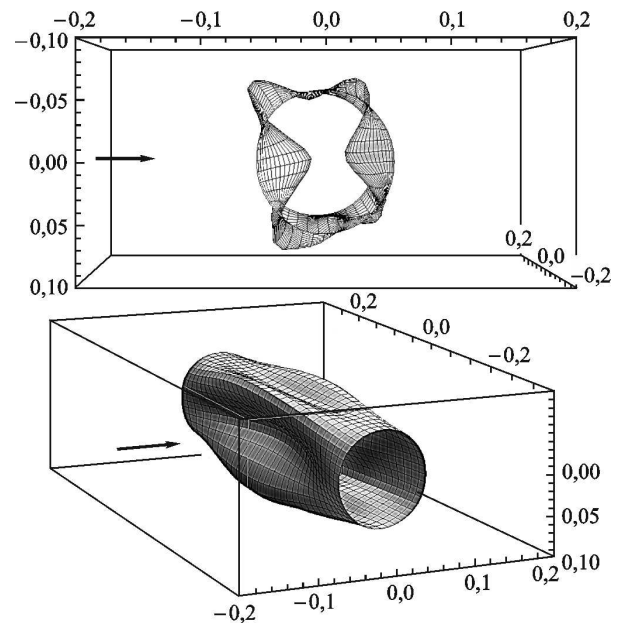


Рис. 3. Деформация цилиндрической оболочки в потоке при $t = 3,4$ с (перемещения $\times 10$)

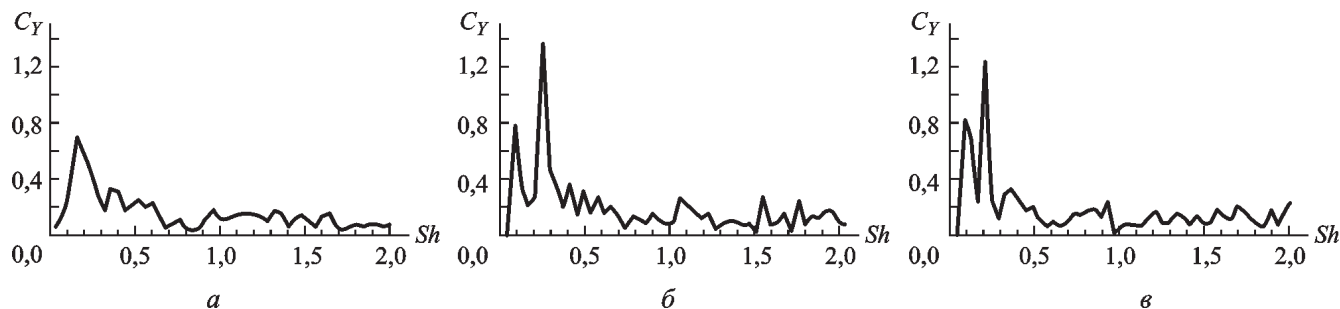


Рис. 4. Спектры коэффициента поперечной нагрузки:

a — абсолютно жесткий цилиндр; *б* — жесткая оболочка; *в* — податливая оболочка

ным $C_x \approx 0,9$. В спектре пульсаций не наблюдается значительных пиков. В то же время коэффициент нормальной силы C_y для упругих оболочек имеет несколько большую (порядка 10%) амплитуду пульсаций и различия в спектре. Спектры коэффициентов C_y для случаев абсолютно жесткого цилиндра, жесткой и податливой оболочки представлены на рис. 4. Сравнение линий спектров показывает, что в случае обтекания упругой конструкции спектр коэффициента становится полигармоническим. Вместо одной частоты $Sh \approx 0,17$ схода вихрей Кармана возникает две гармоники: $Sh \approx 0,06$, $Sh \approx 0,2$ в случае жесткой оболочки и $Sh \approx 0,07$, $Sh \approx 0,16$ в случае податливой оболочки.

Выводы

1. Новый комплексный алгоритм решения сопряженной задачи аэроупругости, основанный на совместном использовании разложения по собственным формам и методе вихревых элементов, позволяет провести прямое численное моделирование колебаний оболочки в пространственном потоке несжимаемой среды. Результаты расчетов показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными.

2. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют моделировать динамику деформируемой поверхности обтекаемого тела не только цилиндрической, но и более сложной формы.

3. Расчетным путем установлено, что местная податливость обтекаемой поверхности и условия ее закрепления оказывают существенное влияние на спектр частот нестационарного коэффициента нормальной силы, приводя к увеличению амплитуды пульсаций и появлению до-

полнительных гармоник даже в случае, когда низшая частота колебаний оболочки существенно больше частоты схода вихрей Кармана.

3. Обнаруженные эффекты показывают, что использование в задачах динамики упругих конструкций, находящихся под действием ветровых нагрузок, вынуждающих сил, заданных полуэмпирическим путем на основе свойств дорожки вихрей Кармана, которая образуется за абсолютно жестким цилиндром, может приводить к неверным результатам.

Литература

- [1] Петров К.П. *Аэродинамика транспортных космических систем*. Москва, Эдиториал УРСС, 2000. 366 с.
- [2] Svetitsky V.A. *Statistical Dynamics and Reliability Theory for Mechanical Structures*. Springer, 2003. 446 p.
- [3] Забегаев А.И. Динамическая модель составной оболочковой конструкции для расчетов нагрузок в условиях интенсивных поперечных воздействий. *Первые Уткинские чтения: Материалы Общесос. науч.-техн. конф.* Санкт-Петербург, 2002, т. 2, с. 138–140.
- [4] Ivanko T.G., Keller D.F. Investigation of ground-wind loads for ares launch vehicles. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2012, vol. 49, no. 4, pp. 574–585. Doi: 10.2514/1.A32177.
- [5] Ермаков А.В. Численное моделирование аэроупругих колебаний профилей с использованием метода вихревых элементов. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2012, № 8. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/445353.html>. Doi: 10.7463/0812.0445353 (дата обращения 20 сентября 2013).
- [6] Earl H. Dowell, Marat Ilgamov *Studies in Nonlinear Aeroelasticity*. Springer, 2011. 455 p.
- [7] Gorshkov A.G., Tarlakovsky D.V., Evseev E.G. *Transient aerohydroelasticity of spherical bodies*. Springer, 2001. 289 p.
- [8] Michael P. Paidoussis, Stuart J. Price, Emmanuel de Langre. *Fluid-Structure Interactions Cross-Flow-Induced Instabilities*. Cambridge University Press, 2014. 414 p.
- [9] Shcheglov G.A. Application of vortons to calculate vibrations of a beam in spatial flow. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, no. 38(4), pp. 319–323. Doi: 10.3103/S1052618809040025.
- [10] Гафуров М.Б., Ильгамов М.А. Изгиб цилиндрической оболочки конечной длины при ее поперечном обтекании жидкостью. *Прикладная механика*, 1978, т. 14, № 3, с. 60–67.
- [11] Ларичкин В.В. *Аэродинамика цилиндрических тел и некоторые инженерные задачи экологии*. Новосибирск, изд-во НГТУ, 2006. 304 с.

References

- [1] Petrov K.P. *Aerodinamika transportnykh kosmicheskikh sistem* [Aerodynamics of space transportation systems]. Moscow, Editorial URSS publ., 2000. 366 p.
- [2] Svetlitsky V.A. *Statistical Dynamics and Reliability Theory for Mechanical Structures*. Springer, 2003. 446 p.
- [3] Zabegaev A.I. *Dinamicheskaya model' sostavnoi obolochkovoi konstruktii dlia raschetov nagruzok v usloviakh intensivnykh poperechnykh vozdeystvii* [Dynamic model of the composite shell construction for the calculation of loads in the conditions of intensive cross-influences]. *Pervye Utkinskie chteniia: Materialy Obshcherossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [First Utkinskie readings: All-Russian Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2002, vol. 2, pp. 138–140.
- [4] Ivanco T.G., Keller D.F. Investigation of ground-wind loads for ares launch vehicles, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2012, vol. 49, no. 4, pp. 574–585. Doi: 10.2514/1.A32177.
- [5] Ermakov A.V. Chislennoe modelirovanie aeroprugikh kolebaniy profili s ispol'zovaniem metoda vikhrevykh elementov [Numerical simulation of aeroelastic vibrations of profiles using the vortex element]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2012, no. 8, pp. 155–168, available at: <http://technomag.edu.ru/doc/445353.html> (accessed 20 September 2013). Doi: 10.7463/0812.0445353.

[6] Earl H. Dowell, Marat Ilgamov *Studies in Nonlinear Aeroelasticity*. Springer, 2011. 455 p.

[7] Gorshkov A.G., Tarlakovsky D.V., Evseev E.G. *Transient aeroelasticity of spherical bodies*. Springer, 2001. 289 p.

[8] Michael P. Paidoussis, Stuart J. Price, Emmanuel de Langre. *Fluid-Structure Interactions Cross-Flow-Induced Instabilities*. Cambridge University Press, 2014. 414 p.

[9] Shcheglov G.A. Application of vortons to calculate vibrations of a beam in spatial flow, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, no. 38(4), pp. 319–323. Doi: 10.3103/S1052618809040025.

[10] Gafurov M.B., Il'gamov M.A. Izgib tsilindricheskoi obolochki konechnoi dliny pri ee poperechnom obtekanii zhidkost'iu [Bending of a cylindrical shell of finite length in her cross-flow fluid]. *Prikladnaia mekhanika* [International Applied Mechanics]. 1978, vol. 14, no. 3, pp. 60–67.

[11] Larichkin V.V. *Aerodinamika tsilindricheskikh tel i nekotorye inzhenernye zadachi ekologii* [Aerodynamics cylindrical bodies and some engineering problems of ecology]. Novosibirsk, NSTU publ., 2006. 304 p.

Статья поступила в редакцию 01.10.2013

Информация об авторах

ЕРМАКОВ Андрей Васильевич (Москва) — аспирант кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: oradev@rambler.ru).

ЩЕГЛОВ Георгий Александрович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: georg@energoman.ru).

Information about the authors

ERMAKOV Andrey Vasil'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Aerospace» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: oradev@rambler.ru).

SHCHEGLOV Georgiy Aleksandrovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Aerospace» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: georg@energoman.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебника «Проектирование автоматизированных станков и комплексов». В 2 т. Т. 1, под ред. П.М. Чернянского.

В первом томе учебника изложены основы проектирования кинематической схемы, несущей системы, привода, надежности и устойчивости динамической системы, а также художественного проектирования станков. Рассмотрены принципы работы и устройства электрофизических и электрохимических станков, специальных станков с циклоидальной схемой обработки. Особое внимание уделено физически обоснованным методам расчета точности и устойчивости динамической системы станков, оптимальных размеров и жесткости шпиндельных узлов и др. Приведена теория и расчет точности станков с использованием упругофрикционной модели точности.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru