

## Исследование пространственной динамики ракеты на старте под действием ветровой нагрузки

© А.А. Сергеева, Р.В. Сидельников

Южно-уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, 454080, Россия

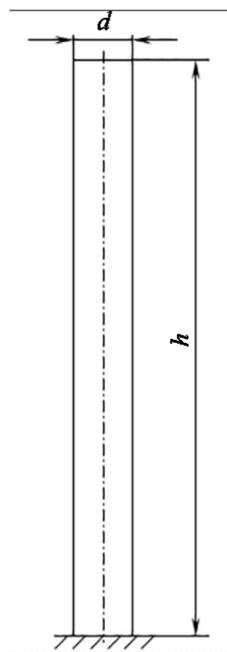
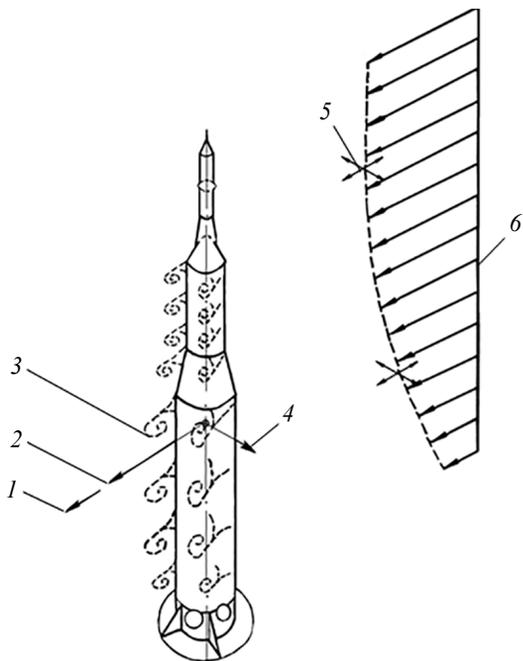
*Рассмотрены вопросы, связанные с методикой выявления возможных резонансных изгибных колебаний ракеты, подверженной ветровому воздействию. В рамках разрабатываемой методики приведен алгоритм расчета корпуса ракеты первого приближения на внешнее ветровое воздействие. В результате вычислений получены значения распределенной по высоте ветровой нагрузки. Для более глубокого изучения вопроса появления резонансных изгибных колебаний проведен анализ влияния возмущающих факторов ветрового воздействия на поведение конструкции цилиндрической формы, который показал значительное увеличение боковой силы по отношению к силе сопротивления в достаточно узком диапазоне чисел Струхала. Полученные результаты отражены на графике зависимости соотношения коэффициентов боковой силы и силы сопротивления от числа Струхала.*

**Ключевые слова:** ракета, боковая сила, ветровая нагрузка, резонансные изгибные колебания

Ракетные конструкции в той или иной мере подвержены ветровому воздействию в горизонтальном направлении. Наличие ветра определяет целый комплекс нагрузок, испытываемых ракетой, находящейся на стартовой площадке, которые оказывают влияние на величину частоты собственных колебаний корпуса ракеты и обычно вызывают затухающие упругие колебания [1].

Принято считать, что ветер состоит из стационарной части, изменяющейся с течением времени и высотой, и нестационарной, вызываемой порывами и атмосферной турбулентностью [2]. Ветровое нагружение представляет собой достаточно сложный процесс, вызывающий пространственные перемещения конструкции. Под действием стационарной части ветра ракета, сопротивляясь, отклоняется в его направлении и деформируется. Вместе с этим нестационарная часть ветра, представленная в виде порывов, вызывает колебания конструкции в том же направлении. В то же время на боковых (относительно направления ветра) сторонах тела обтекания происходят нестационарные срывы потока. Возникая попеременно с противоположных сторон, они приводят к появлению колебаний конструкции в поперечном (по отношению к потоку) направлении [3] (рис. 1).

В целом вопросы воздействия ветра на конструкции и сооружения рассмотрены достаточно хорошо в теоретических (например, методы расчета детерминированных ветровых воздействий, а также случайных с учетом пульсационной составляющей) [4, 5] и практических (практика выполнения подобных расчетов) аспектах [6–10].



**Рис. 1.** Схема ветровых нагрузок, действующих на ракету на стартовой площадке:

1 — изменяющаяся составляющая сопротивления; 2 — постоянная составляющая сопротивления; 3 — срыв вихрей; 4 — изменяющаяся боковая сила; 5 — турбулентные составляющие ветра; 6 — профиль установившегося ветра по высоте

**Рис. 2.** Геометрические характеристики консольно-закрепленного тела цилиндрической формы:

$d = 2,6 \text{ м}$ ;  $h = 29 \text{ м}$

Однако стоит отметить, что большая часть существующей литературы (например, [2, 11]), а также упомянутых исследований по данной теме касается вопросов проектирования строительных сооружений и специальных конструкций, в которых требуется учитывать действие ветра.

Ветровую нагрузку принято рассматривать как динамическую по причине ее непостоянства во времени. Кроме того, она оказывает значительное влияние на конструкцию вследствие того, что при действии этой динамической нагрузки может меняться ее величина, точка приложения и направление [5]. При колебаниях в элементах конструкций возникают значительные силы инерции, влияющие на напряженно-деформированное состояние конструкции и характер ее воздействия: жесткие конструкции воспринимают такую нагрузку как статическую, реакция же гибких будет зависеть от частоты собственных колебаний. Помимо этого, как правило, в расчетах необходимо принимать во внимание влияние порывов ветра, для чего требуется ввести динамические коэффициенты, учитывающие и повторное их действие (например, в СП 20.13330.2011).

В строительстве расчет ветровых нагрузок на высотные здания и сооружения является основным и носит обязательный характер при расчетах их на прочность и деформативность. Ее величина зависит не только от скорости ветра или размеров конструкции, но и конструктивной формы, оценка которой осуществляется с помощью аэродинамических коэффициентов.

В настоящем исследовании сделана попытка использовать имеющиеся данные по расчету строительных сооружений для проведения аналогичных расчетов ракеты, находящейся на стартовой платформе, с некоторыми поправками и допущениями, учитывающими особенности практики проведения исследований с точки зрения аэродинамики и назначения рассчитываемой конструкции. Несмотря на недостаток материалов по данному вопросу на сегодняшний день, отдельные исследования в этой области все же ведутся. В частности, интерес представляет исследование, связанное с изучением влияния воздействия ветра при учете значительного вихреобразования на интенсивность колебаний стартового комплекса ракеты-носителя путем моделирования [12]. Подобная информация может оказаться полезной при дальнейших исследованиях ветрового нагружения на ракетные конструкции с учетом интерференции ракеты и обслуживающих устройств, расположенных вблизи нее, при обтекании ветром.

На данном этапе для упрощения формирования методики такого типа расчетов ракету, находящуюся в открытых условиях старта, будем условно считать консольно-закрепленной. На примере задачи поперечного обтекания тела цилиндрической формы (рис. 2) оценим действующую на него ветровую нагрузку с целью учета ее влияния на поведение конструкции при резонансных изгибных колебаниях.

При решении задачи для аэродинамического расчета была использована модель идеального несжимаемого газа, взятого для стандартной (авиационной) атмосферы на уровне Земли (температура  $T = 288,15$  К; давление  $p = 101\,330$  Па; коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,46 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с; плотность  $r = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>).

Математическую модель в данном случае составляют:

1) уравнение Навье — Стокса

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -(\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} + \nu \Delta \bar{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{f}, \quad (1)$$

где  $\bar{u}$  — векторное поле скоростей;  $t$  — время;  $\nabla$  — оператор Гамильтона;  $\Delta$  — векторный оператор Лапласа;  $\bar{f}$  — векторное поле массовых сил;

2) уравнение неразрывности

$$\nabla \bar{u} = 0. \quad (2)$$

Система уравнений была решена численно с использованием вычислительных возможностей программного комплекса ANSYS Fluent. Все расчеты выполнены с использованием стандартной версии  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности, где кинетическая энергия турбулентности  $k$  и скорость ее диссипации  $\varepsilon$  получают из уравнений переноса (в общем виде) [13]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $u_i$  — декартовы составляющие вектора скорости (в направлении соответствующих осей);  $x_i, x_j$  — декартовы координаты (используемые индексы определяют направление декартовой системы координат);  $\mu = \rho \nu$  — коэффициент динамической вязкости (для несжимаемой жидкости  $\rho = \text{const}$  и  $\mu = \text{const}$ );  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  — коэффициент турбулентной вязкости (где  $C_\mu$  — безразмерная модельная константа);  $\sigma_k = 1,0$  и  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  — турбулентное число Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$  соответственно;  $G_k$  — коэффициент, представляющий из себя возникновение кинетической энергии за счет средних градиентов скорости;  $G_b$  — коэффициент, представляющий из себя возникновение кинетической энергии за счет плавучести;  $Y_M$  — коэффициент, описывающий эффекты сжимаемости в турбулентности для  $k-\varepsilon$ -моделей;  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$  и  $C_{3\varepsilon} = 0,09$  — безразмерные модельные константы;  $S_k$  и  $S_\varepsilon$  — пользовательские параметры для нахождения  $k$  и  $\varepsilon$  соответственно.

Предыдущие исследования [14] на примере связи чисел Струхалия и Рейнольдса показали, что стандартная  $k-\varepsilon$ -модель турбулентности дает результаты, наиболее близкие к экспериментальным. В качестве эталона использована зависимость, установленная Хасаном Арефом [15].

Известно, что картина обтекания (положение точки отрыва пограничного слоя, распределение давлений, интенсивность образова-

ния вихрей за цилиндром) существенно зависит от числа Рейнольдса потока ( $Re = ud/\nu$ ). Максимальные боковые силы возникают при  $Re \approx (1...3) \cdot 10^5$  [3], что, например, при значении диаметра  $d = 2,6$  м соответствует скорости обтекания  $u \approx 0,6...1,7$  м/с. Однако в реальных условиях скорость ветра и его порывов может достигать на порядок больших значений  $u \approx 17$  м/с. Исходя из этого, аэродинамический расчет был проведен в диапазоне  $Re = 1,4 \cdot 10^3...3 \cdot 10^6$ , обуславливающих возникновение за телом вихревой дорожки, и в дозвуковом диапазоне чисел Маха (при  $u = 0,008...17$  м/с). Режим схода вихрей при обтекании цилиндра является существенно нестационарным, поэтому аэродинамический расчет носит нестационарный характер.

Перед тем как приступить к расчету ветровой нагрузки, следует предварительно определить величины частот собственных колебаний исследуемой конструкции, поскольку они служат основой для анализа ее динамических свойств. В случае с летательными аппаратами (ЛА) значения частот собственных колебаний находятся в диапазоне от 1 до десятков Гц для тяжелых ЛА, от нескольких до 100...200 Гц — для легких [16].

Модальный анализ исследуемой конструкции проведен с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical [17]. Для его проведения были взяты жесткостные и массовые характеристики [1], приведенные на рис. 3.

При проведении модального анализа предположим, что демпфирование отсутствует, поэтому уравнение движения в матричной форме имеет вид:

$$[M]\{u''\} + [K]\{u\} = 0, \quad (5)$$

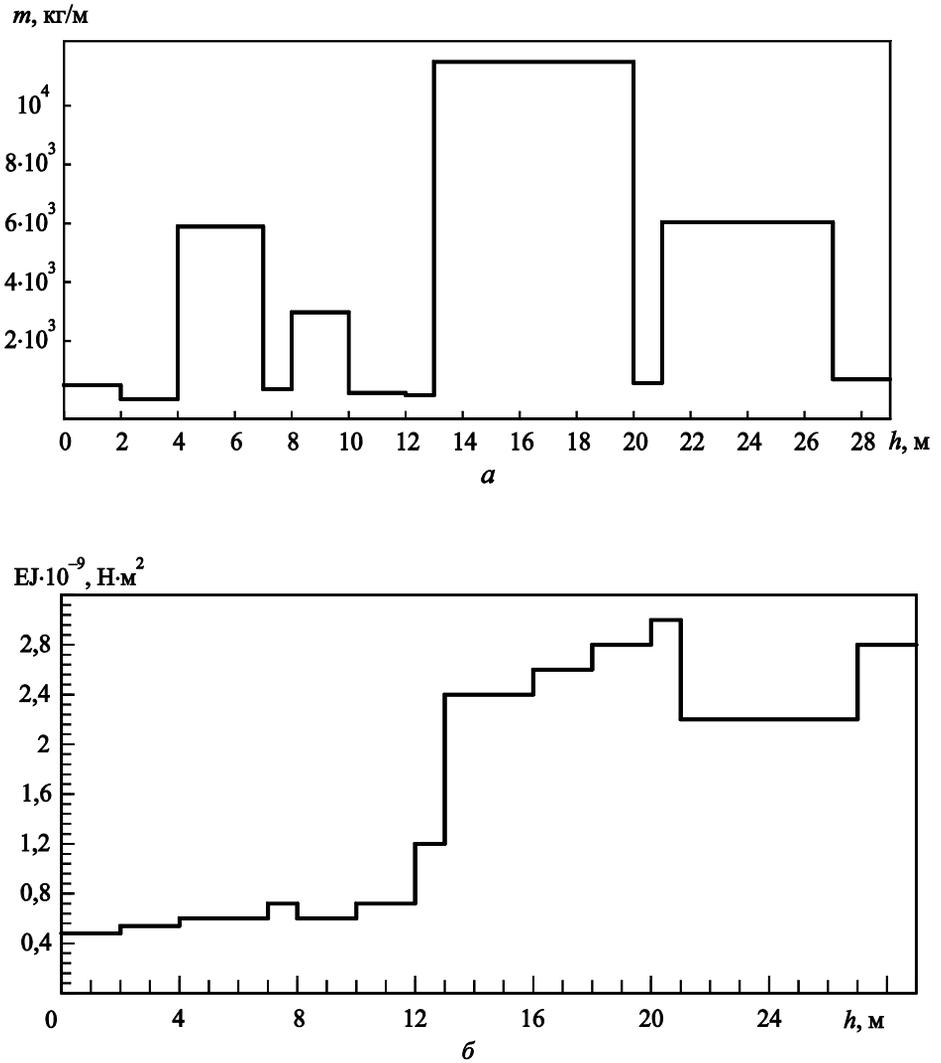
где  $[M]$  — матрица масс;  $\{u''\}$  — вектор узловых ускорений;  $[K]$  — матрица жесткости;  $\{u\}$  — вектор узловых перемещений.

В результате расчетов частот собственных колебаний цилиндра длиной 29 м и диаметром  $d = 2,6$  м (см. рис. 2) были получены значения собственных частот:  $f_1 = 3,11$  и  $f_2 = 8,35$  Гц.

Известно, что нормативное значение ветровой нагрузки  $w$  согласно СП 20.13330.2011 определяется как

$$w = w_m + w_p, \quad (6)$$

где  $w_m$ ,  $w_p$  — средняя и пульсационная составляющие.



**Рис. 3.** Массовые (а) и жесткостные (б) характеристики исследуемой цилиндрической конструкции. Здесь  $h = 29$  м соответствует месту закрепления цилиндра

Значение средней ветровой нагрузки напрямую зависит от ветрового района и типа местности, что принимается в расчет с помощью нормативного значения ветрового давления ветра  $w_0$  и коэффициента  $k(z_e)$ , учитывающего изменение ветрового давления на высоте  $z_e$ :

$$w_m = w_0 k(z_e) c, \tag{7}$$

где  $c$  — аэродинамический коэффициент.

Что касается пульсационной составляющей, для ее расчета необходимы в первую очередь знания частот и форм собственных колебаний конструкции. Согласно СП 20.13330.2011, достаточно первых двух форм и частот  $f_1$  и  $f_2$ . Зная их и предельное значение частоты собственных колебаний  $f_l$ , можно установить, есть ли необходимость учитывать коэффициент динамичности  $\xi$  при расчете  $w_p$ .

Согласно СП 20.13330.2011 (табл. 11.5),  $f_l = 3,4$  Гц. Учитывая ранее найденные значения первых двух собственных частот, получаем  $f_1 < f_l < f_2$ . Тогда значение пульсационной составляющей можно определить по формуле

$$w_p = w_m \xi \zeta(z_e) \nu, \quad (8)$$

где  $\xi = 1,287$  — коэффициент динамичности, значение которого нормировано и определяется по данным рис. 11.1 из СП 20.13330.2011;  $\zeta(z_e) = \zeta_{10}(z_e / 10)^{-\alpha}$  — коэффициент пульсации давления ветра, принимаемый для эквивалентной высоты  $z_e$ ;  $\nu = 0,839$  — коэффициент пространственной корреляции, значение которого нормировано и определяется по данным табл. 11.6 из СП 20.13330.2011.

Таким образом, при подготовке исходных данных необходимо учесть геометрию конструкции (см. рис. 2), ветровой район (II) и тип местности (B), что в итоге даст следующие величины:

Нормативное значение ветрового давления ветра, $w_0$ , кПа .....	0,30
Аэродинамический коэффициент (при $Re = 3 \cdot 10^5$ ), $c$ .....	0,49
Декремент колебаний (сталь), $\delta$ .....	0,15
Собственные частоты, Гц:	
первая $f_1$ .....	3,11
вторая $f_2$ .....	8,35
Коэффициент надежности по нагрузке, $\gamma_f$ .....	1,40

Отметим, что коэффициент надежности по нагрузке вычислен согласно п. 11.1.12 СП 20.13330.2011.

Сам расчет сделан по формулам (6)–(8), его результаты приведены в таблице. Для вычисления значения погонной ветровой нагрузки использована формула

$$q_w = w h_w \gamma_f, \quad (9)$$

где  $h_w$  — приращение высоты.

**Погонные нагрузки от воздействия ветра**

Отметка высоты, м	$k(z_e)$	$w_m$ , кПа	$\zeta(z_e)$	$w_p$ , кПа	$w$ , кПа	$q_w$ , кН/м
0	0,379	0,056	1,388	0,084	0,139	0
3	0,402	0,059	1,349	0,086	0,145	0,913
6	0,530	0,078	1,174	0,099	0,177	0,742
9	0,623	0,092	1,083	0,107	0,199	0,835
12	0,699	0,103	1,022	0,113	0,216	0,908
15	0,764	0,112	0,977	0,119	0,231	0,970
18	0,822	0,121	0,942	0,123	0,244	1,024
21	0,875	0,129	0,914	0,127	0,255	1,073
24	0,923	0,136	0,890	0,130	0,266	1,117
27	0,967	0,142	0,870	0,133	0,275	1,155
29	0,995	0,146	0,857	0,135	0,282	0,790

Результаты, полученные на данном этапе, можно использовать для решения более масштабной задачи, связанной с выявлением резонансных изгибных колебаний конструкции, подверженной ветровой нагрузке определенной величины (т. е. определенному распределению ветровой нагрузки по высоте конструкции).

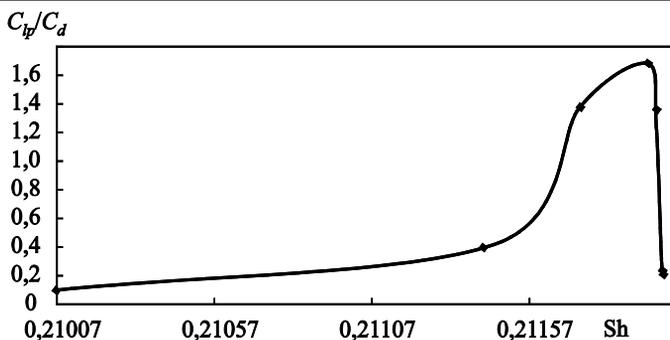
Предварительные исследования в этом направлении [14] показали наличие определенной взаимосвязи между частотой срыва вихрей, характеризуемой числом Струхала  $Sh = nd/u$  (где  $n$  — частота отделения вихрей), и соотношением коэффициентов боковой силы и силы сопротивления  $C_{lp}/C_d$  (рис. 4). При этом учтена имеющаяся взаимосвязь между числами  $Sh$  и  $Re$ , установленная Х. Арефом [15] соотношениями:

- для ламинарного режима (до  $Re \approx 200$ )

$$Sh = 0,2175 - \frac{5,1064}{Re}; \quad (10)$$

- для турбулентного режима, соответствующего  $Re \geq 400$ ,

$$Sh = 0,212 - \frac{2,7}{Re}. \quad (11)$$



**Рис. 4.** Зависимость значений соотношения коэффициентов боковой силы и силы сопротивления от числа Струхала

Все исследования проведены на примере задачи поперечного обтекания цилиндра при дозвуковых скоростях, в связи с тем что она является наиболее простой и функциональной аналогией задачи бокового обтекания ракеты на старте [18, 19]. Задача рассмотрена как несопряженная задача аэроупругости. При этом было учтено, что удлинение исследуемой цилиндрической конструкции приблизительно равно 11, поэтому влиянием краевого эффекта (возникновением вихрей на плоском торце) можно пренебречь [20].

Цель анализа влияния возмущающих факторов ветрового воздействия на поведение конструкции цилиндрической формы — выявление возникновения возможных резонансных изгибных колебаний. По результатам анализа можно заключить, что возможно значительное увеличение боковой силы (более чем в 3,5 раза) по отношению к силе сопротивления в достаточно узком диапазоне чисел Струхала (см. рис. 4). Существующая взаимосвязь отражает влияние частот срыва вихрей на наличие и интенсивность колебаний цилиндрических конструкций в поперечном (по отношению к набегающему потоку) направлении в плоскости обтекания. По этой причине при оценках пространственной динамики конструкции под влиянием возмущающих факторов необходимо учитывать чувствительность боковой силы к незначительным изменениям числа  $Sh$ .

Проведение подобной оценки потребует знания конкретных чисел Рейнольдса, значения которых будут обусловлены начальными и граничными условиями, а также чисел Струхала (что является безразмерной характеристикой частоты срыва вихрей), получаемых компьютерным моделированием. Впоследствии останется лишь соотнести значения частот собственных колебаний системы с диапазоном частот срыва вихрей, что позволит установить диапазон частот, в пределах которого будут иметь место резонансные изгибные колебания, они в свою очередь могут привести к деформации или полному разрушению конструкции.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колесников К.С. *Динамика ракет*. Москва, Машиностроение, 2003, 520 с.
- [2] Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*. Wiley-Interscience, 1978, 468 p.
- [3] Петров К.П. *Аэродинамика транспортных космических систем*. Москва, Эдиториал УРСС, 2000, 368 с.
- [4] Бекмаматова Л.Н., Алексеенко В.Н., Жиленко О.Б. Особенности оценки ветрового воздействия на высотные здания. *XXX Студ. междунар. заочн. науч.-практ. конф. «Молодежный научный форум: технические и математические науки»*, 2016, № 1 (30), с. 4–12.  
URL: [http://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/1\(30\).pdf](http://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/1(30).pdf)
- [5] Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Долженко А.В. Динамический расчет зданий на ветровые нагрузки с учетом пульсационной составляющей. *Электрон. науч. журнал «Apriori. Серия: Естественные и технические науки»*, 2013, № 1. URL: <http://www.apriori-journal.ru/seria2/1-2013/Kravchenko-Trufanova-Dolzhenko.pdf>
- [6] Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК)*, 2006, № 8, с. 18–24.
- [7] Дубинский С.И. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии. *САПР и графика*, 2005, № 10, с. 32–34.
- [8] Дубинский С.И. *Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2010, 21 с.
- [9] Хитрых Д. Численное моделирование ветрового воздействия на высотный комплекс в газодинамическом пакете ANSYS CFX. *ANSYS Advantage. Русская редакция*, 2011, № 15, с. 35–37.
- [10] Сафиуллин И.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотное здание «Лазурные небеса» (г. Казань). *Известия КГАСУ. Серия: Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (в строительстве)*, 2014, № 4 (30), с. 413–417.
- [11] Савицкий Г.А. *Ветровая нагрузка на сооружения*. Москва, Стройиздат, 1972, 110 с.
- [12] Щеглов Г.А., Ермаков А.В. Моделирование колебаний стартового комплекса ракеты-носителя при ветровом воздействии с учетом интенсивности вихреобразования. *Сб. докл. 11-го Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (электрон. изд.)*. Казань, 20–24 августа 2015 г. Казань, Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015, 4481 с.
- [13] *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS Fluent Release 13.0 ANSYS, Inc., 2010, 752 p.
- [14] Сергеева А.А., Сидельников Р.В. Влияние нестационарности обтекания на динамику полета летательного аппарата. *Материалы 67-й науч. секции техн. наук. Челябинск, 17–23 апреля 2015 г., ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)*. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2015, с. 331–336.
- [15] Ареф Х. Вихревая динамика волновых следов. *Нелинейная динамика*, 2006, т. 2, № 4, с. 411–424.
- [16] Диментберг Ф.М., Колесников К.С., ред. *Вибрации в технике. В 6 т. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов*. Москва, Машиностроение, 1980, 544 с.

- [17] *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. ANSYS Mechanical Release 13.0 ANSYS, Inc., 2010, 988 p.
- [18] Петров К.П. *Аэродинамика тел простейших форм*. Москва, Факториал, 1998, 432 с.
- [19] Петров К.П. *Аэродинамика ракет*. Москва, Машиностроение, 1977, 136 с.
- [20] Ларичкин В.В. *Аэродинамика цилиндрических тел и некоторые инженерные задачи экологии*. Новосибирск, Издательство НГТУ, 2006, 303 с.

Статья поступила в редакцию 29.06.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сергеева А.А., Сидельников Р.В. Исследование пространственной динамики ракеты на старте под действием ветровой нагрузки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-5-1615>

**Сергеева Анастасия Андреевна** — аспирант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет (НИУ). Область научных интересов: нестационарная аэродинамика летательных аппаратов.  
e-mail: [nastya.sergeeva.91@gmail.com](mailto:nastya.sergeeva.91@gmail.com)

**Сидельников Рудольф Васильевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет (НИУ). Область научных интересов: аэродинамика летательных аппаратов, моделирование аэродинамических процессов на малых и гиперзвуковых скоростях.  
e-mail: [sidelnikovrv@susu.ru](mailto:sidelnikovrv@susu.ru)

# Investigating three-dimensional dynamics of a rocket on a launch pad subjected to wind loading

© A.A. Sergeeva, R.V. Sidelnikov

South Ural State University (National research university),  
Chelyabinsk, 454080, Russia

*The article deals with the issues related to the methodology of detecting possible resonant flexural vibrations of a rocket subjected to wind loads. As part of the methodology under development, we provide an algorithm for calculating the first approximation of how the rocket body responds to external wind loading. We present the calculation results as a table containing full wind loading distribution over altitude. Besides, so as to more thoroughly investigate the issue of resonant flexural vibrations appearing, we analysed the effect that the perturbing factors of wind loading have on the behaviour of a cylindrically shaped structure. It showed a significant increase in the lateral force as compared to drag for a quite narrow Strouhal number range. We present the results in the form of plotting power characteristics (ratios of the lateral force coefficient to the drag coefficient) against the Strouhal number.*

**Keywords:** rocket, lateral force, wind load, resonant flexural vibrations

## REFERENCES

- [1] Kolesnikov K.S. *Dinamika raket* [Rocket dynamics]. 2nd edition. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 520 p.
- [2] Simiu E., Scanlan R.H. *Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering*. John Wiley & Sons Inc., 1978, 468 p.
- [3] Petrov K.P. *Aerodinamika transportnykh kosmicheskikh sistem* [Aerodynamics of space transportation systems]. Moscow, Editorial URSS, 2000, 368 p.
- [4] Bekmamatova L.N., Alekseenko V.N., Zhilenko O.B. Osobennosti otsenki vetrovogo vozdeystviya na vysotnye zdaniya [Specifics of estimating wind loads on high-rise buildings]. *XXX stud. mezhdunar. zaochn. nauch.-prakt. konf. "Molodezhnyy nauchnyy forum: tekhnicheskije i matematicheskie nauki"* [Proc. of the XXX Student Int. Extramural Scientific-practical Conf. "Youth Scientific Forum: Engineering and Mathematical Sciences"], 2016, no. 1 (30), pp. 4–12. Available at: [http://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/1\(30\).pdf](http://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/1(30).pdf)
- [5] Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Dolzhenko A.V. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Apriori. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskije nauki — Apriori Journal. Natural and Engineering Sciences Series*, 2013, no. 1. Available at: <http://www.apriori-journal.ru/seria2/1-2013/Kravchenko-Trufanova-Dolzhenko.pdf>
- [6] Guvernyuk S.V., Gagarin V.G. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (AVOK) — Abok (Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal)*, 2006, no. 8, pp. 18–24.
- [7] Dubinskiy S.I. *SAPR i grafika — CAD and graphics*, 2005, no. 10, pp. 32–34.
- [8] Dubinskiy S.I. *Chislennoe modelirovanie vetrovykh vozdeystviy na vysotnye zdaniya i komplekсы. Avtoref. dis. .... kand. tekhn. nauk* [Numerical modelling of wind effects on high-rise buildings and architectural complexes. Autoref. cand. eng. sc. diss.]. Moscow, 2010, 21 p.

- [9] Khitrykh D. *ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya — ANSYS Advantage. Russian edition*, 2011, no. 15, pp. 35–37.
- [10] Safiullin I.I. *Izvestiya KGASU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie, chislennyye metody i komplekсы programm (v stroitelstve) — News of the KSUAE. Ser. Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programs (in building)*, 2014, no. 4 (30), pp. 413–417.
- [11] Savitskiy G.A. *Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya* [Wind loads on structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 111 p.
- [12] Scheglov G.A., Ermakov A.V. Modelirovanie kolebaniy startovogo kompleksa rakety nositelya pri vetrovom vozdeystvii s uchetom intensivnosti vikhreobrazovaniya [Simulating vibrations of a launch system launch pad under wind loading with regard to vortex formation]. *Sb. dokl. 11-go Vserossiyskogo s'ezda po fundamentalnym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki (elektronnoe izdanie). Kazan, 20–24 avgusta 2015* [Proc. of the 11th All-Russian congress on basic problems of theoretical and applied mechanics]. Kazan, Kazan (Volga region) Federal University Publ., 2015, 4481 p.
- [13] *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS Fluent Release 13.0 ANSYS, Inc., 2010, 752 p.
- [14] Sergeeva A.A., Sidelnikov R.V. Vliyanie nestatsionarnosti obtekaniya na dinamiku poleta letatel'nogo apparata [Effect of non-steady flow on aircraft flight dynamics]. *Materialy 67-y nauchnoy konferentsii sektsii tekhnicheskikh nauk, Chelyabinsk, 17–23 aprelya 2015, FGBOU VPO YuUrGU (NIU)* [Proc. of the 67th scientific conference, Section for Engineering Sciences, Chelyabinsk, April 17–23 2015, South Ural State University (National research university)]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2015, pp. 331–336.
- [15] Aref Kh. *Nelineynaya dinamika — Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2006, vol. 2, no. 4, pp. 411–424.
- [16] Dimentberg F.M., Kolesnikov K.S., eds. *Vibratsii v tekhnike. V 6 tomakh. Tom 3. Kolebaniya mashin, konstruksiy i ikh elementov* [Vibrations in engineering. In 6 vols. Vol. 3. Oscillations of machines, structures and their elements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 544 p.
- [17] *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. ANSYS Mechanical Release 13.0. ANSYS, Inc., 2010, 988 p.
- [18] Petrov K.P. *Aerodinamika tel prosteyshikh form* [Aerodynamics of simplest-shaped solids]. Moscow, Faktorial Publ., 1998, 480 p.
- [19] Petrov K.P. *Aerodinamika raket* [Rocket aerodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 136 p.
- [20] Larichkin V.V. *Aerodinamika tsilindricheskikh tel i nekotorye inzhenernye zadachi ekologii* [Aerodynamics of cylindrical bodies and specific engineering problems of ecology]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2006, 303 p.

**Sergeeva A.A.**, post-graduate student, Department of Aircraft and Automated Plants, South Ural State University (National Research University). Specializes in unsteady aerodynamics of aircraft. e-mail: nastya.sergeeva.91@gmail.com

**Sidelnikov R.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aircraft and Automated Plants, South Ural State University (National Research University). Specializes in aircraft aerodynamics; modelling aerodynamic processes at low and hypersonic speeds. e-mail: sidelnikovrv@susu.ru