

## Строительная механика

Научная статья

УДК 69.04

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/130-140>

О.С. Горячевский, И.Ю. Негрозова

ГОРЯЧЕВСКИЙ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ – заместитель директора, [osgoryachevskij@mail.ru](mailto:osgoryachevskij@mail.ru),  
<https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>НЕГРОЗОВА ИРИНА ЮРЬЕВНА – младший научный сотрудник, [irina-lanzova@mail.ru](mailto:irina-lanzova@mail.ru),  
<https://orcid.org/0000-0001-8501-9306>Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий,  
сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова*Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет*

Москва, Россия

## Неопределенность назначения ветровых нагрузок от флага

**Аннотация.** Освещена актуальность определения ветровых нагрузок на свободно развевающиеся флаги в связи с возникшей тенденцией к соревновательному строительству сверхвысоких флагштоков, снабженных флагами огромной площади. Приведены основные научные работы, в которых предпринимались попытки исследовать сложное явление обтекания потоком развевающегося флага. Проведено сопоставление ветровых нагрузок на флаги, определенных по различной нормативно-технической литературе. В результате сопоставительного анализа выявлены существенные различия в ветровых нагрузках, определенных по различным источникам. Даны рекомендации проектировщикам.

**Ключевые слова:** ветровая нагрузка, флаг, флагшток

**Для цитирования:** Горячевский О.С., Негрозова И.Ю. Неопределенность назначения ветровых нагрузок от флага // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С.130–140.

### Введение

Относительно недавно возникшая мода на возведение флагштоков рекордной высоты (рис. 1) требует сложных и дорогих конструктивных решений (например, устройство гасителей колебаний) и выводит задачу обоснования механической безопасности на другой уровень – объекты выше 100 м считаются уникальными. В частности, флагштоки высотой 175 м планируются к возведению на береговой линии Парка 300-летия Санкт-Петербурга (рис. 1д). Определение ветровых воздействий для таких конструкций, особенно от флага, размеры которого зачастую достигают циклопических размеров, становится крайне актуальной задачей.

Механическая безопасность высоких флагштоков, расположенных на открытом воздухе, в первую очередь определяется способностью противостоять ветровым нагрузкам двух типов:

- основная ветровая нагрузка;
- нагрузки от резонансного вихревого возбуждения.

Для обоих типов ветровая нагрузка складывается в основном из приходящейся на стойку и на флаг. Как правило, стойка флагштока представляет собой круглую трубу переменного сечения, и ветровые воздействия на неё при проектировании определяются с помощью

© Горячевский О.С., Негрозова И.Ю., 2022

Статья: поступила: 05.10.2022; рецензия: 18.11.2022; финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект: «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» FSWG-2020-0007).

известных методов: физического (экспериментального) моделирования [2, 11], математического (численного) моделирования [2, 5] или попросту из справочных данных [3, 6, 10, 15]. Таким образом, для стойки флагштока нет принципиальных проблем с определением основных ветровых нагрузок и нагрузок от резонансного вихревого возбуждения.

Совсем другая ситуация обстоит с ветровыми воздействиями на флаг. В справочной литературе и нормативных документах можно найти значения аэродинамических коэффициентов «лобового сопротивления» (вдоль потока) для флагов, но нет никаких данных, позволяющих определить ветровые нагрузки поперек потока и частоты срыва вихрей, необходимые для расчета конструкции на вихревое возбуждение [1, 3, 8, 9, 15]. Динамическое поведение флага в ветровом потоке также важно для корректного учета пульсационной составляющей ветровой нагрузки, но в имеющихся источниках обычно делается отсылка, что динамический эффект уже учтен в значении аэродинамического коэффициента [8, 9, 15]. Такая отсылка является некорректной, так как динамический отклик зависит от собственных форм и частот колебаний конструкции.

С представленными в нормативной и технической литературе данными по аэродинамическим коэффициентам лобового сопротивления тоже есть неопределенность. Почти во всех случаях (кроме [8]) они определены на основе лабораторных испытаний маленьких флагов. Однако обтекание флага воздухом при высоких скоростях ветра – это сложный аэроупругий процесс, моделировать который можно только при соблюдении целого ряда условий подобия. Стандартный подход к продувке макетов зданий с фиксированными точками отрыва потока, обосновывающийся предположением о сохранении автомодельности даже при числах Рейнольдса порядка  $10^8$ , для аэроупругих явлений совершенно некорректен.



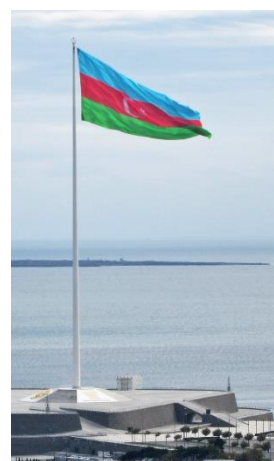
а



б



в



г



д

**Рис. 1. Высочайшие флагштоки в мире:**

**а – Каир, Египет (201,95 м, 2021 г); б – Джидда, Саудовская Аравия (171 м, 2014 г);  
в – Душанбе, Таджикистан (165 м, 2011 г); г – Баку, Азербайджан (162 м, 2010 г);  
д – Санкт-Петербург, Россия (концепт)**

Цель данного исследования – осветить проблему существенной неопределенности в опубликованных параметрах ветровых воздействий для флагов и предложить некоторые пути её решения. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- обзор методов моделирования ветровых воздействий на флаги;
- обзор нормативной и технической литературы по назначению ветровых нагрузок на флаги;
- сравнение ветровых нагрузок, полученных по различным источникам;
- выработка предложений по решению проблемы.

### **История моделирований развевающихся флагов**

Развевающиеся на ветру флаги – обыкновенное явление, но его исследование по-прежнему остается сложной задачей как для экспериментальных, так и для численных подходов, в первую очередь из-за сложного поведения свободно движущихся границ. Есть множество достойных исследований, посвященных решению данной проблемы. Однако до сих пор остаются значимыми расхождения в обнаруживаемых закономерностях и их интерпретации.

Результаты экспериментального исследования развевающихся флагов в однородном потоке представлены в работе [29], где показано, что флаг переходит из устойчивого режима в «хлопающий» (конец флага начинает совершать движение в противоположную потоку сторону и издавать соответствующий звук – эффект, схожий с ударом кнутом). Подобное явление наблюдалось в экспериментах с жидкостью с мыльной пленкой, текущей под действием силы тяжести [27, 36]. В этом исследовании приводится сравнение обтекания гибкой шелковой нити и жесткой металлической проволоки и утверждается, что сопротивление жидкости для гибкой нити в 2–3 раза меньше, чем для проволоки. Численное моделирование поведения гибкого упругого волокна, погруженного в двумерный вязкий поток, также показало, что гибкое волокно испытывает меньшее сопротивление по сравнению с более жестким [37, 39].

Численное моделирование развевающегося флага получило большее распространение после разработки метода погруженной границы (immersed boundary) [18, 27, 30, 37, 38] из-за его простоты и эффективности при обработке больших перемещений и деформаций твердого тела в газовой/жидкой среде. С помощью численного моделирования, проведенного с использованием метода погруженной границы, впервые была подтверждена теоретическая оценка [28], что для устойчивых взмахов флага необходима некоторая минимальная масса [38]. Численное моделирование, представленное в работе [29], показало, что ненулевая масса является необходимым условием для установления устойчивого режима взмахов одиночного флага в конвективно-неустойчивых потоках, в то время как для ситуации с несколькими флагами, установленными с малым шагом в абсолютно неустойчивых течениях, это условие не является обязательным. В случае с несколькими флагами наблюдалось больше вариантов «хлопающих» режимов, чем в случае с одиночным [1, 16, 21, 26, 38]. Например, при изменении расстояния между тремя линейно расположенными флагами в численных исследованиях обнаружилось пять «хлопающих» режимов [31]. Исследование трехмерного флага [19, 33] выявило, что по сравнению с двухмерным флагом, трехмерный более стабилен. Также показано [19], что число Струхала зависит от плотности флага  $St \sim \rho_s^{-1/2}$ , где  $\rho_s$  – поверхностная плотность флага.

В одних исследованиях рассматривалось обтекание флагов в однородном потоке с граничными условиями дальнего поля или условиями «симметрии», чтобы исключить влияние границ области [14, 21, 31, 37, 38]. В других, наоборот, изучалось влияние границ, так называемый эффект стенки [12, 17, 23–25, 34, 35].

### **Обзор нормативной и технической литературы по назначению ветровых нагрузок на флаги**

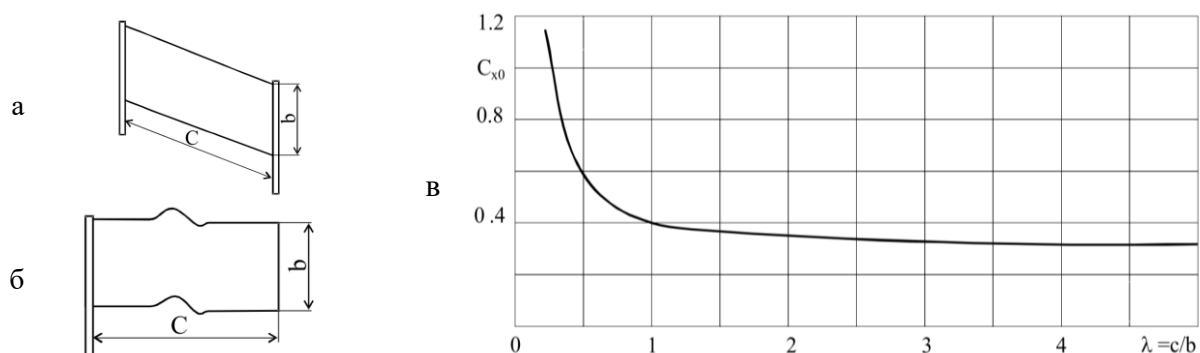
В «Руководстве по расчету зданий и сооружений на действие ветра», подготовленном М.Ф. Барштейном [1], в пункте 5.18 приводится рекомендация по назначению коэффициента

лобового сопротивления, а именно принять его равным 1,4. Дополнительно дано указание по учету площади: для натянутого флага учитывается вся его площадь, подверженная действию ветра; для свободно висящего флага –  $\frac{1}{4}$  его площади.

В «Атласе аэродинамических характеристик строительных конструкций», составленном М.А. Березиным и В.В. Катюшиным [3], приводятся коэффициенты лобового сопротивления для натянутых и свободно висящих флагов (рис. 2). Так, для натянутых флагов (рис. 2а) с соотношением сторон  $\lambda = c/b = 1 \dots 6$  и числом Рейнольдса  $Re = bU/\nu = 10^5 \dots 10^6$  ( $U$  – скорость потока,  $\nu$  – кинематическая вязкость среды), независимо от типа ткани, рекомендуется принять коэффициент лобового сопротивления равным 1,17. Для свободно висящих флагов при тех же соотношениях сторон и числах Рейнольдса дана формула для вычисления коэффициента лобового сопротивления шелковых флагов:

$$C_x = C_{x0} \cdot K, \quad (1)$$

где  $C_{x0}$  – коэффициент лобового сопротивления шелкового флага ( $\gamma=100$  [г/м<sup>2</sup>]);  $K = (0,006\gamma + 0,4)$  – поправочный коэффициент;  $\gamma$  [г/м<sup>2</sup>] – удельная плотность флага.



**Рис. 2. Из «Атласа аэродинамических характеристик»:**  
а – схема натянутого флага; б – схема свободно висящего флага;  
в – коэффициент лобового сопротивления шелкового флага плотностью 100 г/м<sup>2</sup>

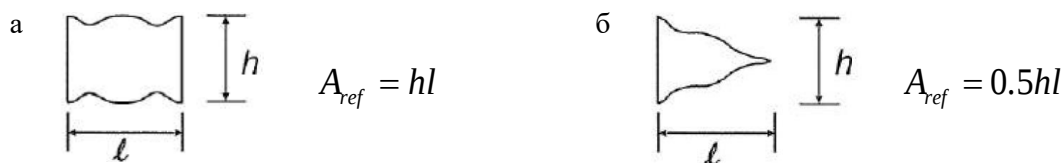
В Eurocode [15] даются следующие рекомендации по назначению коэффициента лобового сопротивления:

- для натянутых флагов принять равным 1,8;
- для свободно висящих флагов следует определять по формуле

$$c_f = 0.02 + 0.7 \frac{m_r}{\rho h} \cdot \left( \frac{A_{ref}}{h^2} \right)^{-1.25}, \quad (2)$$

где  $m_r$  – масса на единицу площади флага,  $\rho$  – плотность воздуха,  $h$  – высота флага,  $A_{ref}$  – базовая площадь (рис. 3).

Указано, что формула для незакрепленных флагов уже содержит динамические силы с учетом эффекта развевания (флаттера).

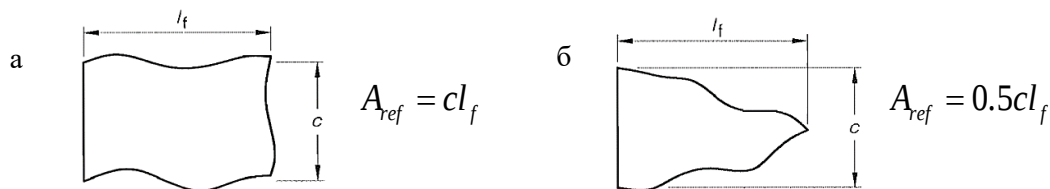


**Рис. 3. Базовые площади флагов согласно Eurocode:**  
а – схема прямоугольного флага; б – схема треугольного флага

В нормах Австралии/Новой Зеландии AS-NZS 1170-2 [9] приводится формула для определения аэродинамического коэффициента для свободно закрепленных флагов:

$$c_f = 0.05 + 0.7 \frac{m_f}{\rho_{air} c} \cdot \left( \frac{A_{ref}}{c^2} \right)^{-1.25}, \quad (3)$$

где  $m_f$  – масса на единицу площади флага;  $\rho_{air}$  – плотность воздуха;  $c$  – высота флага;  $l_f$  – длина флага;  $A_{ref}$  – базовая площадь флага (рис. 4).



**Рис. 4. Базовые площади флагов согласно Австралийским/Новозеландским нормам:  
а – схема прямоугольного флага; б – схема треугольного флага**

Заметим, что в нормах Австралии/Новой Зеландии AS-NZS 1170-2 используется скорость ветра с 3-секундным интервалом осреднения, а пульсационную составляющую скорости при определении суммарной ветровой нагрузки определять не требуется.

В нормах США ASCE 7-16 [10] имеется ссылка на Руководство по проектированию металлических флагштоков ANSI/NAAMM FP1001-07 [8]. Согласно ANSI/NAAMM FP1001-07 нагрузка, действующая на стойку в результате воздействия ветра на флаг, должна быть рассчитана по следующим формулам:

– для нейлоновых и хлопковых флагов

$$W_F = 0.0730 V^2 \sqrt{A_F} C_h G, \quad (4)$$

– для флагов из полиэстера

$$W_F = 0.1022 V^2 \sqrt{A_F} C_h G, \quad (5)$$

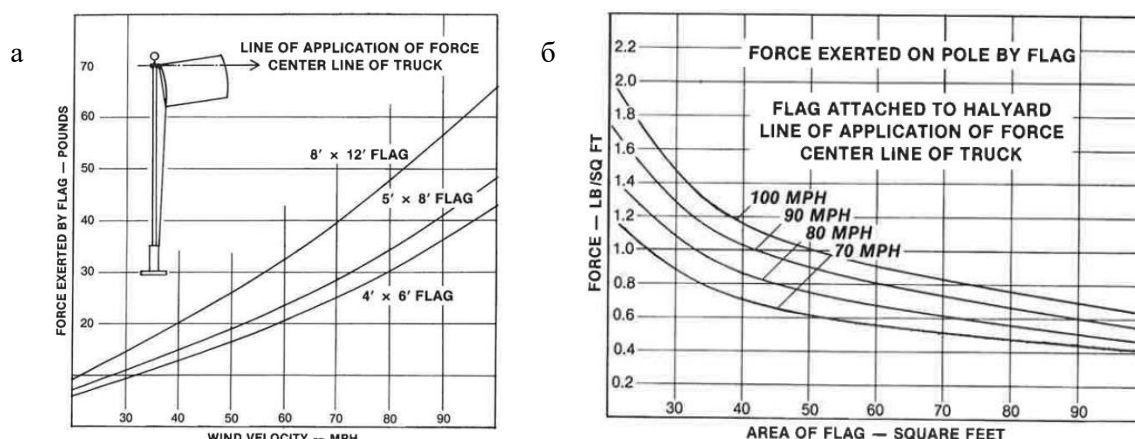
где  $W_F$  – ветровая нагрузка от флага на флагшток;  $V$  – скорость ветра с 3-секундным интервалом осреднения ( $\text{м/с}^2$ );  $A_F$  – площадь флага ( $\text{м}^2$ );  $C_h$  – коэффициент, учитывающий изменение ветровой нагрузки по высоте;  $G$  – коэффициент воздействия порыва (рекомендовано использовать минимальное значение 1.14).

Выражения (4) и (5) представляют собой эмпирические формулы, основанные на данных, полученных в результате летных испытаний нейлоновых прямоугольных флагов  $1,52 \times 2,44$  м ( $3,72 \text{ м}^2$ ),  $2,44 \times 3,66$  м ( $8,92 \text{ м}^2$ ),  $3,66 \times 5,49$  м ( $20,07 \text{ м}^2$ ),  $4,57 \times 7,62$  м ( $34,84 \text{ м}^2$ ) и  $6,1 \times 9,14$  м ( $55,74 \text{ м}^2$ ). В дополнение к пяти нейлоновым флагам был протестирован один флаг из полиэстера размером  $4,57 \times 7,62$  м. При испытаниях данные о ветровых воздействиях были записаны для скоростей ветра: 30,9; 36; 41,2; 46,3; 51,4 и 56,6 м/с.

Формулы (4) и (5) представляют собой значения, которые достаточно хорошо аппроксимируют данные, непосредственно полученные при испытаниях. Результаты летных испытаний, имеют серьезное преимущество по сравнению с данными лабораторных испытаний, которые использовались в качестве основы для определения ветровых нагрузок в ранних версиях стандарта и в [12]. Это преимущество обусловлено фактически натурными условиями проведенных опытов, такими как реальные масштабы флагов, скорости ветра и атмосферная турбулентность.

Считается, что результаты проведенных NAAMM летных испытаний лучшие из доступных в настоящее время. Хотя летные испытания с хлопковыми флагами не проводились, такие флаги прошли сравнительные лабораторные испытания на ветровую нагрузку с нейлоновыми флагами, и было установлено, что они обладают эквивалентным сопротивлением.

Старые рекомендации [12] основывались на испытаниях небольших флагов трех размеров ( $4 \times 6$ ,  $5 \times 8$  и  $8 \times 12$  футов) при скоростях ветра от 20 до 100 миль/час, генерируемых авиационной турбиной, и были представлены только в графическом виде (рис. 5).



**Рис. 5. Рекомендации по назначению ветровых нагрузок согласно [12]:  
а – зависимость нагрузки от скорости ветра для разных размеров флагов;  
б – зависимость погонной нагрузки от площади флага для разных скоростей**

Примечательно, что полученная зависимость ветровой нагрузки от скорости ветра далека от квадратичной (рис. 5а). Следовательно, стандартный подход по определению ветровых нагрузок через аэродинамический коэффициент, не зависящий от скорости ветра, в данном случае некорректен.

### **Сравнение нормативной и технической литературы по назначению ветровых нагрузок на флаги**

Для иллюстрации огромных отличий в ветровых нагрузках от флагов, полученных по различным нормативным и техническим документам, приведем графики значений приведенных аэродинамических коэффициентов для различных размеров флагов. Во всех случаях считаем флаг расположенным на высоте 100 м над землей во II ветровом районе и типе местности А согласно СП 20.13330.2016 [6].

Приведенный аэродинамический коэффициент определяется по формуле

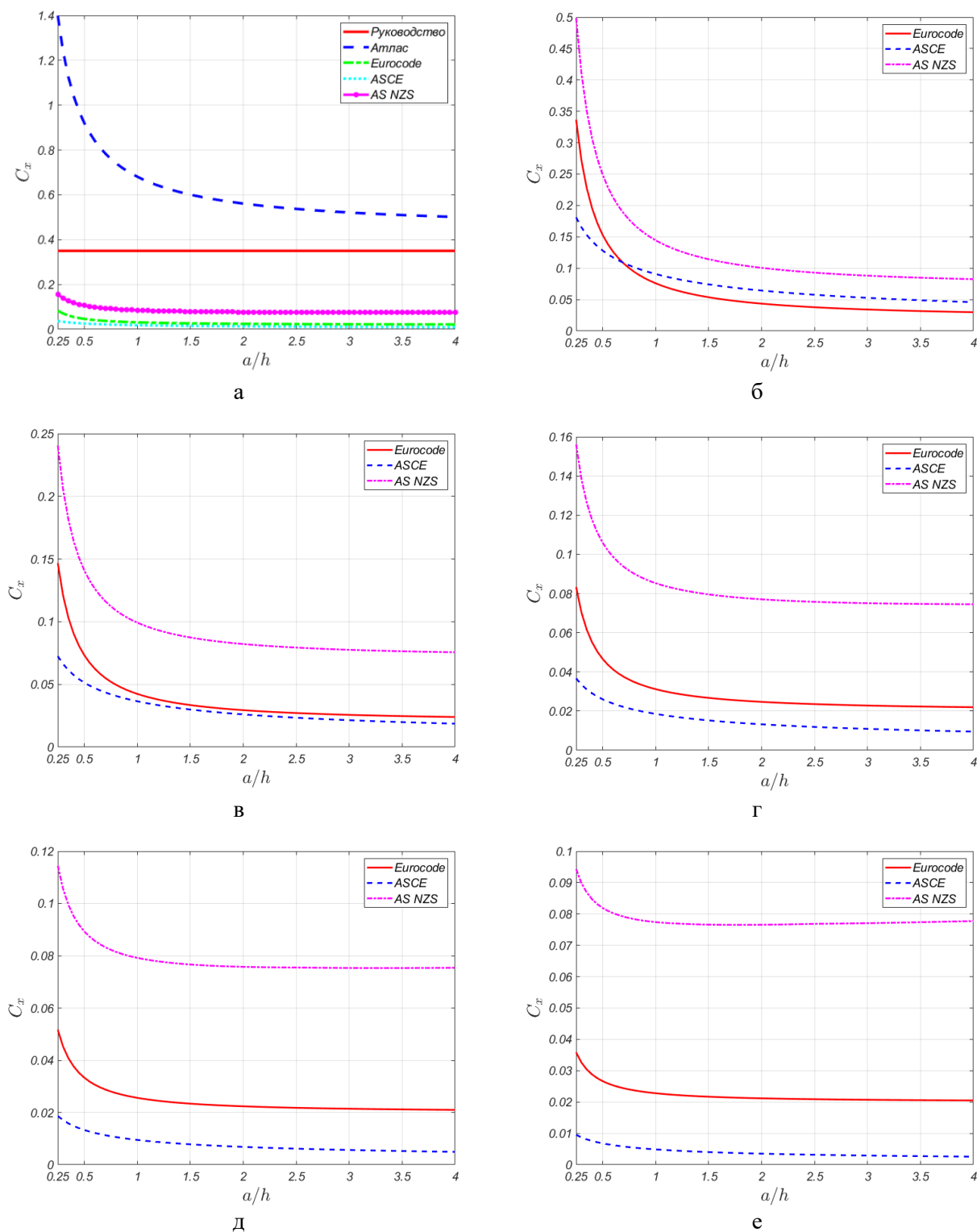
$$C_x = \frac{F_x}{w_0 k (1 + \zeta v) A}, \quad (6)$$

где  $F_x$  – ветровая нагрузка, определенная по различным источникам;  $A$  – площадь флага;  $w_0 = 300$  Па – нормативный напор;  $k(100 \text{ м}) = 2,00$  – высотный коэффициент;  $\zeta(100 \text{ м}) = 0,54$  – коэффициент пульсаций;  $v$  – коэффициент пространственной корреляции пульсаций (зависит от размера флага).

Для единообразия в характеристиках набегающего потока в формулах (4), (5) вместо высотного коэффициента  $C_h$  использовался аналогичный в СП [6] коэффициент  $k(z_e) = k(100 \text{ м}) = 2,00$ . Так как в формулах (3)–(5) принята скорость ветра с 3-секундным осреднением, а в СП [6] принята 10-минутное осреднение, то скорость  $V = V_3$  определялась с пересчетом из  $V_{600}$  по рекомендациям ASCE [10]:

$$V_3 = 1.434 \cdot V_{600} = 1.434 \cdot \sqrt{\frac{2w_0}{\rho_{air}}} = 1.434 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 300 \text{ Па}}{1.25 \text{ кг/м}^3}} = 31.42 \text{ м/с}. \quad (7)$$

На рис. 6 представлены значения приведенного аэродинамического коэффициента  $C_x$  (б) прямоугольного флага в зависимости от степени удлинения  $a/h$  ( $a$  – длина флага по направлению ветра,  $h$  – высота). Из рисунка следует, что  $C_x$ , согласно данным Руководства [1] и Атласа [3], существенно выше, чем по нормативным документам [8, 9, 15]. Поэтому на рис. 6 б–е приведены графики только для нормативных документов.



**Рис. 6. Сравнение приведенного аэродинамического коэффициента в зависимости от отношения длины к высоте флага для различных высот флага  $h$ : а –  $h=10$  м (5 источников); б –  $h=2$  м; в –  $h=5$  м; г –  $h=10$  м; д –  $h=20$  м; е –  $h=40$  м**

### Заключение

В результате обзорного исследования выявлена недостаточная изученность физических процессов, происходящих при обтекании флагов потоком воздуха. Возникающие динамические эффекты при «хлопающем» режиме обтекания флага имеют в основном качественное описание, не позволяющее сделать надежные количественные оценки частотно-амплитудных характеристик сил, передающихся на флагшток.

В нормативной и технической литературе наблюдается серьезная неопределенность предлагаемых аэродинамических коэффициентов. Количественный анализ показывает, что определяемые по разным источникам нагрузки от флага различаются многократно. Судя по всему, аэродинамические коэффициенты, предлагаемые в Руководстве [1] и Атласе [3], сильно завышены, что может затруднить проектирование высоких флагштоков, снабженных флагами большой площади. Авторы статьи рекомендуют использовать в проектировании данные Еврокода как легко применимые и основанные на одинаковом с СП 20.13330.2016 [6] 10-минутном интервале осреднения скорости ветра. Рекомендации американского сообщества инженеров-строителей [8] кажутся наиболее надежными, так как основаны на исследованиях в натурном масштабе в условиях реальных турбулентных скоростей ветра. Кроме того, количественный анализ показал, что нагрузки согласно [8] оказываются самыми низкими из представленных. Однако использовать в проектировании рекомендации [8] следует с осторожностью, так как они основаны на 3-секундном осреднении скорости ветра. Отечественные метеостанции не предоставляют данных по скоростям ветра с 3-секундным осреднением, а использование эмпирических зависимостей [10] может быть ненадежным.

Результаты моделирования ветровых нагрузок на маленькие флаги в аэродинамических трубах переносить на крупные флаги некорректно, так как в таком сложном аэроупругом процессе не может быть и речи об автомодельности [4]. Численное моделирование указанного явления представляется довольно перспективным с научной точки зрения, однако его достоверность должна быть валидирована натурными данными.

Имея в виду возросшую в последние годы актуальность вопроса о ветровых нагрузках от флагов, авторы статьи выражают надежду на появление новых исследований, основанных на реальных натурных данных. Получить натурные данные можно было бы с помощью размещения систем мониторинга на высоких флагштоках, фиксирующих скорости ветра и соответствующие ускорения вершины флагштока.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект: «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» FSWG-2020-0007).*

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барштейн М.Ф. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. Москва: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1978. 215 с.
2. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Москва: Изд-во АСВ, 2017. 720 с.
3. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Олден-полиграфия, 2003. 130 с.
4. Горлин С.М. Экспериментальная аэродинамика. Москва: Высшая школа, 1970. 423 с.
5. Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий: Методическое пособие. Москва: ФАУ ФЦС Минстроя России, 2020. URL: [https://www.faufcc.ru/upload/methodical\\_materials/mp11\\_2020.pdf](https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp11_2020.pdf)
6. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия (с изм. N 1, 2, 3). Москва: Минрегион России, 2021.
7. Alben S. Wake-mediated synchronization and drafting in coupled flags. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009;641:489–496. DOI: 10.1017/S0022112009992138
8. ANSI/NAAMM FP1001-07 Guide Specifications for Design of Metal Flagpoles, 2007
9. AS-NZS 1170-2. Australian / New Zealand standard, structural design actions. Part 2: Wind actions. 2011.
10. ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other Structures. USA, ASCE, 2017.
11. ASCE/SEI 49-21. Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures. USA, ASCE, 2021.
12. Metal Flagpole Manual. Chicago, Illinois, NAAM, 1980. 43 p.

13. Dai L., He G., Zhang X. Self-propelled swimming of a flexible plunging foil near a solid wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2016;11(4):046005. DOI: 10.1088/1748-3190/11/4/046005
14. Eloy C. et al. Aeroelastic instability of cantilevered flexible plates in uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;611(1):97–106. DOI:10.1017/S002211200800284X
15. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–4: General actions – Wind action, CEN, 2010.
16. Farnell D.J.J., David T., Barton D.C. Coupled states of flapping flags. *Journal of fluids and structures*. 2004;19(1):29–36. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2003.10.001
17. Fernández-Prats R. et al. Large-amplitude undulatory swimming near a wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(1):016003. DOI: 10.1088/1748-3190/10/1/016003
18. Huang W. X., Shin S. J., Sung H. J. Simulation of flexible filaments in a uniform flow by the immersed boundary method. *Journal of computational physics*. 2007;226(2):2206–2228. DOI: 10.1016/j.jcp.-2007.07.002
19. Huang W. X., Sung H. J. Three-dimensional simulation of a flapping flag in a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010;653:301–336. DOI: 10.1017/S0022112010000248
20. Lantsova I. Numerical simulation of fluid-structure interaction by the example of a flow past a cylinder with a flexible thin structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021;1030(1):012084. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012084
21. Michelin S., Smith S.G.L. Linear stability analysis of coupled parallel flexible plates in an axial flow. *Journal of Fluids and Structures*. 2009;25(7):1136–1157. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2009.06.002
22. Michelin S., Smith S.G.L., Glover B. J. Vortex shedding model of a flapping flag. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;617:1–10. DOI: 10.1017/S0022112008004321
23. Park S.G., Kim B., Sung H.J. Hydrodynamics of a self-propelled flexible fin near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(5):051902. DOI: 10.1063/1.4983723
24. Quinn D.B. et al. Unsteady propulsion near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;742:152–170. DOI: 10.1017/jfm.2013.659
25. Quinn D.B., Lauder G.V., Smits A.J. Flexible propulsors in ground effect. *Bioinspiration & biomimetics*. 2014;9(3):036008. DOI: 10.1088/1748-3182/9/3/036008
26. Schouveiler L., Eloy C. Coupled flutter of parallel plates. *Physics of fluids*. 2009;21(8):081703. DOI: 10.1063/1.3204672
27. Shelley M. J., Zhang J. Flapping and bending bodies interacting with fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011;43(1):449–465. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145456
28. Shelley M., Vandenbergh N., Zhang J. Heavy flags undergo spontaneous oscillations in flowing water. *Physical review letters*. 2005;94(9):094302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.094302
29. Taneda S. Waving motions of flags. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1968;24(2):392–401. DOI:10.1143/JPSJ.24.392
30. Tian F. B. et al. An efficient immersed boundary-lattice Boltzmann method for the hydrodynamic interaction of elastic filaments. *Journal of computational physics*. 2011;230(19):7266–7283. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.05.028
31. Tian F.B. et al. Coupling modes of three filaments in side-by-side arrangement. *Physics of Fluids*. 2011;23(11):111903. DOI: 10.1063/1.3659892
32. Tian F.B. Role of mass on the stability of flag/flags in uniform flow. *Applied Physics Letters*. 2013;103(3):034101. DOI: 10.1063/1.4813006
33. Tian F., Lu X., Luo H. Onset of instability of a flag in uniform flow. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2012;2(2):022005. DOI: 10.1063/2.1202205
34. Wang S., He G., Zhang X. Self-propulsion of flapping bodies in viscous fluids: recent advances and perspectives. *Acta Mechanica Sinica*. 2016;32(6):980–990. DOI: 10.1007/s10409-016-0578-y
35. Zhang C., Huang H., Lu X. Y. Free locomotion of a flexible plate near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(4):041903. DOI: 10.1063/1.4981778
36. Zhang J. et al. Flexible filaments in a flowing soap film as a model for one-dimensional flags in a two-dimensional wind. *Nature*. 2000;408(6814):835–839. DOI: 10.1038/35048530
37. Zhu L., Peskin C. S. Drag of a flexible fiber in a 2D moving viscous fluid. *Computers & fluids*. 2007;36(2):398–406. DOI:10.1016/j.compfluid.2006.02.002
38. Zhu L., Peskin C. S. Interaction of two flapping filaments in a flowing soap film. *Physics of fluids*. 2003;15(7):1954–1960. DOI: 10.1063/1.1582476
39. Zhu L., Peskin C. S. Simulation of a flapping flexible filament in a flowing soap film by the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*. 2002;179(2):452–468. DOI: 10.1006/jcph.2002.7066

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/130-140>

Goryachevsky O., Negrozova I.

OLEG S. GORYACHEVSKY, Deputy Director, [osgoryachevskij@mail.ru](mailto:osgoryachevskij@mail.ru),<https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>IRINA Yu. NEGROZOVA, Junior Researcher, [irina-lanzova@mail.ru](mailto:irina-lanzova@mail.ru),<https://orcid.org/0000-0001-8501-9306>

Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings,

Structures and Complexes named after A.B. Zolotova

National Research Moscow State University of Civil Engineering

Moscow, Russia

### Uncertainty of assignment of wind loads from the flag

**Abstract.** This article discusses the relevance of determining wind loads on freely waving flags in connection with the emerging trend towards the competitive construction of ultra-high flagpoles equipped with flags of a huge area. The main scientific works have been reviewed in which attempts to investigate the complex phenomenon of flow around a waving flag was made. A comparison of wind loads on the flags calculated using different approaches from codes and standards as well as from available technical literature is provided. As a result of comparative analysis, significant differences in wind loads determined using various methods were revealed. Recommendations for engineers and designers are developed and provided in this paper.

**Keywords:** wind load, flag, flagpole

**For citation:** Goryachevsky O., Negrozova I. Uncertainty of assignment of wind loads from the flag. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):130–140. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

### REFERENCES

1. Barstein M.F. Guidance for the calculation of buildings and structures for the action of the wind. Moscow, TsNIISK named after Kucherenko. 1978. 215 p. (In Russ.).
2. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Afanas'eva I.N. Computational aerodynamics in construction problems. Tutorial. Moscow, ASV Publishing House, 2017. 720 p. (In Russ.).
3. Berezin M.A., Katyushin V.V. Atlas of aerodynamic characteristics of building structures. Novosibirsk, Olden-Polygraphy, 2003. 130 p. (In Russ.).
4. Gorlin S.M. Experimental aerodynamics. Moscow, Vysshaja shkola, 1970. 423 p. (In Russ.).
5. Methodological manual "Mathematical (numerical) modeling of wind loads and impacts" (to SP 20.13330.2016). Moscow, FAU FTS of the Ministry of Construction of Russia, 2020. URL: [https://www.faufcc.ru/upload/methodical\\_materials/mp11\\_2020.pdf](https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp11_2020.pdf) (In Russ.).
6. SP 20.13330.2016 Loads and impacts (as amended No. 1, 2, 3). Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2021. (In Russ.).
7. Alben S. Wake-mediated synchronization and drafting in coupled flags. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009;641:489–496. DOI: 10.1017/S0022112009992138
8. ANSI/NAAMM FP1001-07 Guide Specifications for Design of Metal Flagpoles, 2007
9. AS-NZS 1170-2. Australian / New Zealand standard, structural design actions. Part 2: Wind actions. 2011.
10. ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other Structures. USA, ASCE, 2017.
11. ASCE/SEI 49-21. Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures. USA, ASCE, 2021.
12. Metal Flagpole Manual. Chicago, Illinois, NAAM, 1980. 43 p.
13. Dai L., He G., Zhang X. Self-propelled swimming of a flexible plunging foil near a solid wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2016;11(4):046005. DOI: 10.1088/1748-3190/11/4/046005

14. Eloy C. et al. Aeroelastic instability of cantilevered flexible plates in uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;611):97–106. DOI:10.1017/S002211200800284X
15. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–4: General actions – Wind action, CEN, 2010.
16. Farnell D.J.J., David T., Barton D.C. Coupled states of flapping flags. *Journal of fluids and structures*. 2004;19(1):29–36. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2003.10.001
17. Fernández-Prats R. et al. Large-amplitude undulatory swimming near a wall. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(1):016003. DOI: 10.1088/1748-3190/10/1/016003
18. Huang W. X., Shin S. J., Sung H. J. Simulation of flexible filaments in a uniform flow by the immersed boundary method. *Journal of computational physics*. 2007;226(2):2206–2228. DOI: 10.1016/j.jcp.-2007.07.002
19. Huang W. X., Sung H. J. Three-dimensional simulation of a flapping flag in a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010;653:301–336. DOI: 10.1017/S0022112010000248
20. Lantsova I. Numerical simulation of fluid-structure interaction by the example of a flow past a cylinder with a flexible thin structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021;1030(1):012084. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012084
21. Michelin S., Smith S.G.L. Linear stability analysis of coupled parallel flexible plates in an axial flow. *Journal of Fluids and Structures*. 2009;25(7):1136–1157. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2009.06.002
22. Michelin S., Smith S.G.L., Glover B. J. Vortex shedding model of a flapping flag. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;617:1–10. DOI: 10.1017/S0022112008004321
23. Park S.G., Kim B., Sung H.J. Hydrodynamics of a self-propelled flexible fin near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(5):051902. DOI: 10.1063/1.4983723
24. Quinn D.B. et al. Unsteady propulsion near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;742:152–170. DOI: 10.1017/jfm.2013.659
25. Quinn D.B., Lauder G.V., Smits A.J. Flexible propulsors in ground effect. *Bioinspiration & biomimetics*. 2014;9(3):036008. DOI: 10.1088/1748-3182/9/3/036008
26. Schouveiler L., Eloy C. Coupled flutter of parallel plates. *Physics of fluids*. 2009;21(8):081703. DOI: 10.1063/1.3204672
27. Shelley M. J., Zhang J. Flapping and bending bodies interacting with fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011;43(1):449–465. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145456
28. Shelley M., Vandenberghe N., Zhang J. Heavy flags undergo spontaneous oscillations in flowing water. *Physical review letters*. 2005;94(9):094302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.094302
29. Taneda S. Waving motions of flags. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1968;24(2):392–401. DOI:10.1143/JPSJ.24.392
30. Tian F. B. et al. An efficient immersed boundary-lattice Boltzmann method for the hydrodynamic interaction of elastic filaments. *Journal of computational physics*. 2011;230(19):7266–7283. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.05.028
31. Tian F.B. et al. Coupling modes of three filaments in side-by-side arrangement. *Physics of Fluids*. 2011;23(11):111903. DOI: 10.1063/1.3659892
32. Tian F.B. Role of mass on the stability of flag/flags in uniform flow. *Applied Physics Letters*. 2013;103(3):034101. DOI: 10.1063/1.4813006
33. Tian F., Lu X., Luo H. Onset of instability of a flag in uniform flow. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2012;2(2):022005. DOI: 10.1063/2.1202205
34. Wang S., He G., Zhang X. Self-propulsion of flapping bodies in viscous fluids: recent advances and perspectives. *Acta Mechanica Sinica*. 2016;32(6):980–990. DOI: 10.1007/s10409-016-0578-y
35. Zhang C., Huang H., Lu X. Y. Free locomotion of a flexible plate near the ground. *Physics of Fluids*. 2017;29(4):041903. DOI: 10.1063/1.4981778
36. Zhang J. et al. Flexible filaments in a flowing soap film as a model for one-dimensional flags in a two-dimensional wind. *Nature*. 2000;408(6814):835–839. DOI: 10.1038/35048530
37. Zhu L., Peskin C. S. Drag of a flexible fiber in a 2D moving viscous fluid. *Computers & fluids*. 2007;36(2):398–406. DOI:10.1016/j.compfluid.2006.02.002
38. Zhu L., Peskin C. S. Interaction of two flapping filaments in a flowing soap film. *Physics of fluids*. 2003;15(7):1954–1960. DOI: 10.1063/1.1582476
39. Zhu L., Peskin C. S. Simulation of a flapping flexible filament in a flowing soap film by the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*. 2002;179(2):452–468. DOI: 10.1006/jcph.2002.7066