

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ СЕЧЕНИЯ МОСТА ЧАСТЬ 1: ОЦЕНКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СЕЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ МЕТОДАМИ

И.Ю. Ланцова¹, И.Н. Афанасьева^{2,3}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

² ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДиО», г. Москва, РОССИЯ

³ Флоридский университет, г. Гейнсвилл, США

Аннотация: Данная статья посвящена оценке аэродинамической неустойчивости мостовых конструкций. В ходе численного моделирования были получены аэродинамические характеристики, которые были использованы для оценки аэродинамической неустойчивости согласно Еврокоду. В многовариантных расчетах для исследования влияния турбулентности использовались две модели турбулентности (k-w SST и DES). Используя инженерные оценки, приведенные в Еврокоде, были определены критические скорости возникновения галопирования, дивергенции и вихревого возбуждения для сечения Такомского моста. Также представлено сравнение результатов для критериев аэродинамической неустойчивости, полученные для разных моделей турбулентности. Полученные результаты показали качественное совпадение для рассмотренных моделей турбулентности.

Ключевые слова: аэродинамическая неустойчивость, галопирование, дивергенция, вихревое возбуждение, CFD, мост

SIMULATION OF AERODYNAMIC INSTABILITY OF STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF THE BRIDGE SECTION PART 1: EVALUATION OF AERODYNAMIC INSTABILITY OF THE SECTION BY ENGINEERING METHODS

Irina Yu. Lantsova¹, Irina N. Afanasyeva^{2,3}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

² Scientific Research Center “StadyO”, Moscow, RUSSIA

³ University of Florida, Gainesville, USA

Abstract: This paper is devoted to aerodynamic instability of bridge structures. CFD simulation was used to obtain criteria of aerodynamic instability by Eurocode. Two models of turbulence (k-w SST and DES) were used in multivariate calculations to investigate influence of turbulence. Galloping, divergence and vortex shedding were investigated for Takoma bridge using engineering criteria from Eurocode. Comparison of results of all criteria is presented as well. Results show qualitative coincidence of two different models.

Keywords: aerodynamic instability, galloping, divergence, vortex shedding, CFD, bridge

1. ВВЕДЕНИЕ

Висячие мосты обладают рядом неоспоримых достоинств по сравнению с конструкци-

ями мостов других типов. Однако уже давно было замечено, что висячие мосты весьма ненадежны при сильном ветре. Одной из крупнейших в истории мостостроения ката-

строф стало обрушение моста через реку Такома (США) 7 ноября 1940 года. Строительство этого моста (рис. 1) было закончено летом 1940 года. Пролет – третий в мире по длине – имел длину 854 м. Большого движения не ожидалось, и мост был построен очень узким – шириной 11,9 м. Проезжая часть была рассчитана на 2 ряда автомобилей. Полотно дороги было подвешено на двух стальных канатах со стрелой провеса 70,7 м.



Рисунок 1. Обрушение Такомского моста.

Сразу после постройки была обнаружена большая чувствительность моста к действию ветра – амплитуды (размахи) колебаний моста достигали 1,5 м. Было сделано несколько попыток устранить эти большие колебания путем введения дополнительных связей и установки гидравлических демпферов (амортизаторов) на пилонах. Но это не предотвратило катастрофы.

Начиная с 8 часов утра 7 ноября наблюдались не очень сильные вертикальные (в форме нескольких волн) изгибные колебания с частотой 0,8 Гц. Примечательно, что ветер имел не очень большую скорость – около 17 м/с, тогда как до этого были случаи, когда мост выдерживал более сильный ветер. Около 10 часов утра скорость ветра несколько возросла (до 18,7 м/с), и установились (в форме одной волны) изгибно-крутильные колебания со значительно меньшей частотой (0,2 Гц) и весьма большими амплитудами. Когда закрутка достигала максимума, проезжая часть наклонялась к горизонту под углом 45°. Резкое изменение частоты колебаний произошло, по-видимому, вследствие обрыва каких-то важных связей в конструк-

ции. Мост выдерживал эти колебания около часа, после чего большой участок проезжей части полотна отломился и упал в воду. Весь процесс был заснят на киноплёнку, что явилось ценным материалом для исследования причин обрушения. [1]

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования аэродинамической устойчивости была выбрана задача взаимодействия сечения моста на реке Такома с воздушным потоком.

Данная задача была представлена коллективом ученых из Китая на международной конференции (The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) Shanghai, China; September 2-6, 2012). Свои результаты они представили в [2], где описывается их методика связанного решения задачи с применением программного комплекса ANSYS Fluent с авторским программным комплексом. Геометрические параметры сечения указаны на рис. 2

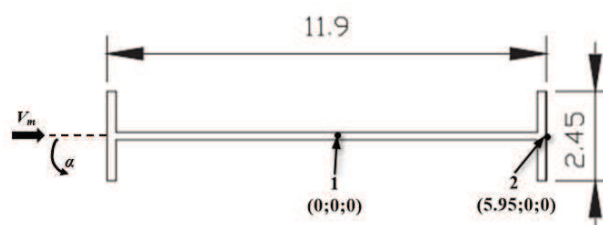


Рисунок 2. Геометрические параметры сечения.

Для решения задачи были выделены следующие этапы:

- 1) Подбор параметров расчетной модели, при помощи тестовых расчетов для различных размеров сетки;
- 2) Исследование обтекания сечения моста как жесткого тела, при различных углах атаки ветра при скорости ветра 10 м/с для определения критериев и критических скоростей аэродинамической неустойчивости;

- 3) Исследования взаимного влияния аэродинамического потока и гибкой упругой конструкции путем прямого связанного аэроупругого расчета при различных скоростях ветра, для определения условия наступления аэродинамической неустойчивости;
- 4) Сопоставление результатов инженерных оценок и прямого связанного расчета.

В ходе основных аэродинамических расчетов определялись следующие параметры:

1) Аэродинамические коэффициенты:

– аэродинамический коэффициент лобового сопротивления:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{in}^2 \cdot L \cdot H} \quad (2.1)$$

– аэродинамический коэффициент подъемной силы:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{in}^2 \cdot L \cdot H} \quad (2.2)$$

– аэродинамический коэффициент момента:

$$C_{Mz} = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{in}^2 \cdot L^2} \quad (2.3)$$

где F_D , F_L – аэродинамические силы лобового сопротивления (вдоль оси OX) и подъемной силы (вдоль оси OY) соответственно для рассматриваемой конструкции; M_z – аэродинамический момент относительно оси кручения OZ на единицу длины пролета H ; ρ – плотность воздуха, равная 1.185 кг/м^3 ; V_m – средняя скорость потока, равная 10 м/с ; L – ширина сечения.

2) Частоты колебаний (f_{FD} , f_{FL}) и число Струхала:

$$Sh = \frac{B \cdot f_{FL}}{V_m} \quad (2.4)$$

где B – высота сечения; f_{FL} – частота колебаний подъемной силы F_L (частота срыва вихрей).

Поскольку задача рассматривается в двумерной постановке, т.е. решается в плоскости OXY , в направлении оси Z расчетная область дискретизирована на один элемент, размер которого равен 0.1 м .

Все аэродинамические расчеты проводились с использованием специализированного программного комплекса ANSYS CFX.

3. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

3.1. Параметры расчетов.

Для аэродинамических расчетов вся конструкция рассматривалась как абсолютно жесткое неподвижное тело. Расчеты проводились в нестационарной постановке.

Так как при числах Рейнольдса $\sim 10^6$ поток является турбулентным, для замыкания уравнений Навье-Стокса использовались модели турбулентности, а именно URANS $k-\omega$ SST и Detached Eddy Simulation (DES SST) [3]. Для дискретизации по пространству применялся метод конечных объемов (МКО).

Для расчетов в нестационарной постановке физическое время составило $\sim 80 \text{ с}$.

3.2. Расчетные сетки.

Расчетная область разбивалась на элементы в ANSYS Workbench. Варианты расчетных сеток (Моделей) представлены в таблице 1. и на рис. 3.

3.3. Граничные и начальные условия.

На *входе* задано условие *INLET* ($U=V_m$, $V=W=0$) с горизонтальной направленной скоростью потока, равномерно распределенной по высоте. Для определения аэродинамических характеристик (аэродинамических коэффициентов и частоты срыва вихрей) значение скорости V_m было принято равным 10 м/с .

Моделирование аэродинамической неустойчивости строительных конструкций на примере сечения моста.
 Часть 1: Оценка аэродинамической неустойчивости сечения инженерными методами.

Таблица 1. Параметры расчетных сеток для CFD-тестов.

Вариант расчетной сетки	Кол-во узлов	Пограничный слой			Размер эл-в в объеме 1	Размер эл-в в объеме 2	Размер эл-в на поверхности сечения
		Толщина первого слоя, м	Кол-во слоев	Кэф-т прогрессии			
Модель 1	1 611 548	3.0e-5	20	2.2	2.5e-2	0.25	2.0e-3
Модель 2	846 742	3.0e-5	15	2.5	3.0e-2	0.3	5.0e-3
Модель 3	526 814	3.0e-5	15	2.5	3.5e-2	0.4	1.0e-2
Модель 4	381 894	3.0e-5	15	2.5	4.0e-2	0.4	2.0e-2
Модель 5	235 200	3.0e-5	10	3	5.0e-2	0.5	3.0e-2
Модель 6	378 858	5.0e-4	15	2	4.0e-2	0.4	2.0e-2
Модель 7	223 778	5.0e-4	10	2.2	5.0e-2	0.5	4.0e-2
Модель 8	215 904	1.0e-3	10	2	5.0e-2	0.5	1.0e-1
Модель 9	201 314	1.0e-3	10	2.2	8.0e-2	0.6	1.0e-1

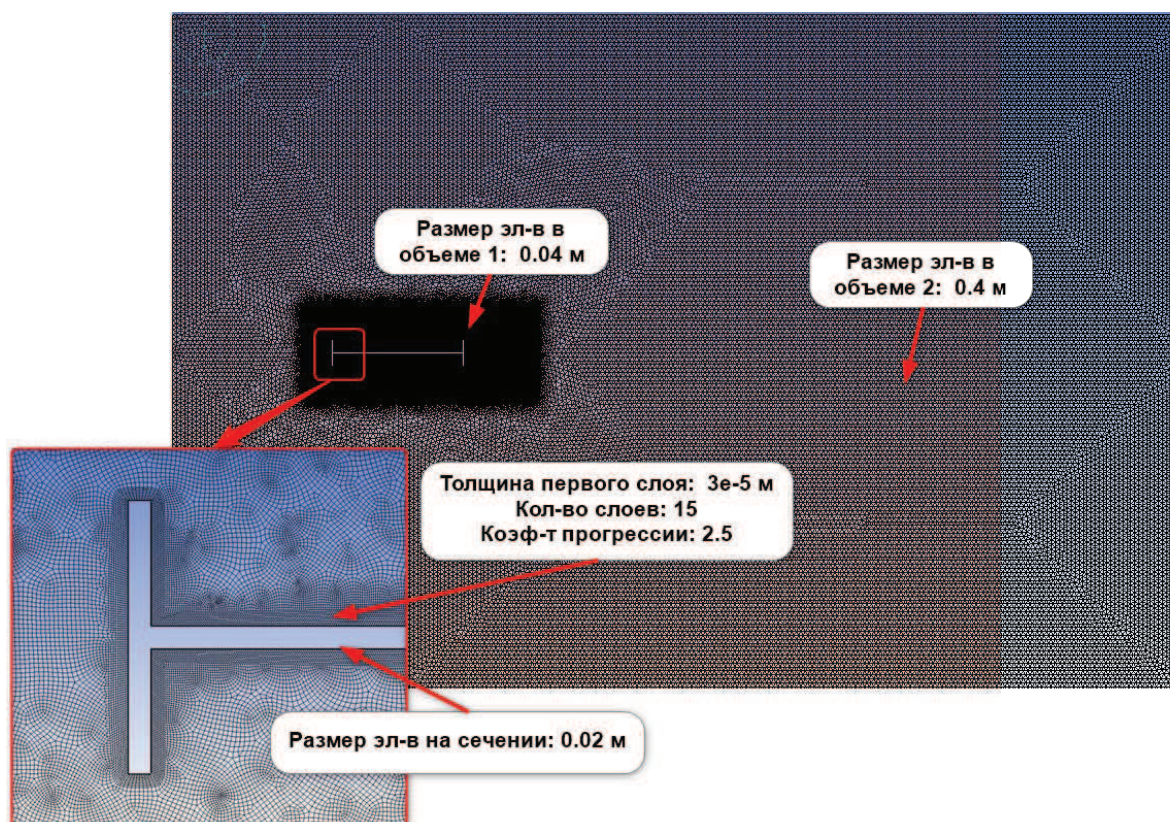


Рисунок 3. Расчетная сетка: Модель 4 (381 894 узлов).

В качестве условия на *выходе* (*Outlet*) канала были заданы «мягкие» граничные условия «*Opening*» с осредненным относительным давлением равным нулю. Так как задача решалась в двумерной постановке, то на *боковых границах* области были заданы условия симметрии «*Symmetry*». На поверхности об-

текаемого тела применялось условие прилипания на стенке «*No Slip Wall*». В качестве *начальных условий* для задач была принята скорость, равная 0.

4. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СЕЧЕНИЯ

4.1. Вихревое возбуждение.

Вихревое возбуждение возникает, если вихри попеременно срываются с противоположных краев конструкции, в результате чего возникает переменная нагрузка, перпендикулярная направлению действия ветра.

Если частота вихревых возбуждений совпадает с собственной частотой конструкции, могут возникнуть колебания большой амплитуды. Это происходит при так называемой критической скорости ветра. В Eurocode [4] приводится формула, для вычисления этой скорости:

$$V_{cr,i} = \frac{B \cdot f_i}{Sh} \quad (4.1)$$

где B – ширина поперечного сечения в зоне вихревого возбуждения; f_i – собственная частота i -ой формы изгибных колебаний в поперечном к направлению действия ветра

направлении (в данном случае $f_i = 0.13$ Гц соответствует первой частоте собственных колебаний); Sh – число Струхала.

Согласно Eurocode [4] эффект вихревого возбуждения должен исследоваться, если отношение максимального размера конструкции к минимальному в плоскости, нормальной направлению действия ветра, превышает 6.

Вызываемое вихревое возбуждение не нужно исследовать, если

$$V_{cr,i} > 1.25 \cdot V_m \quad (4.2)$$

где $V_{cr,i}$ – критическая скорость ветра согласно для i -ой собственной формы колебаний; V_m – средняя скорость потока ветра.

Ниже представлены результаты нестационарных расчетов, в ходе которых были определены частоты срыва вихрей при различных углах атаки. Затем для полученных частот были вычислены числа Струхала Sh и по формуле (4.6) определена критическая скорость ветра ($f_i = 0.13$ Гц) (таблица 2).

Таблица 2. Числа Струхала Sh и значения критической скорости ветра V_{cr} для различных углов α , °.

Угол α , °	Sh	V_{cr} , м/с	Угол α , °	Sh	V_{cr} , м/с
0	0.131	2.44	40	0.152	8.13
1	0.142	2.44	45	0.162	8.13
2	0.153	2.44	50	0.192	7.22
3	0.164	2.44	55	0.201	7.22
4	0.175	2.44	60	0.188	7.98
5	0.185	2.44	65	0.189	8.13
10	0.149	3.90	70	0.216	7.22
15	0.153	4.64	75	0.218	7.22
20	0.178	4.64	80	0.219	7.22
25	0.130	7.22	85	0.217	7.22
30	0.113	9.29	90	0.214	7.22
35	0.141	8.13	–	–	–

4.2. Галопирование.

Галопирование – аэродинамическая неустойчивость, характерная для гибких сооружений с особыми формами поперечного

сечения. При определенных условиях в таких сооружениях возможны колебания с большими амплитудами в перпендикулярном потоку направлении. [5]

В начале по критерию Глауэрта–Ден-Гартога (необходимое условие) определяются углы, при которых возможно возникновение галопирования.

Ниже представлены результаты нестационарных расчетов, в ходе которых были определены значения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления C_D и подъемной силы C_L при различных углах атаки.

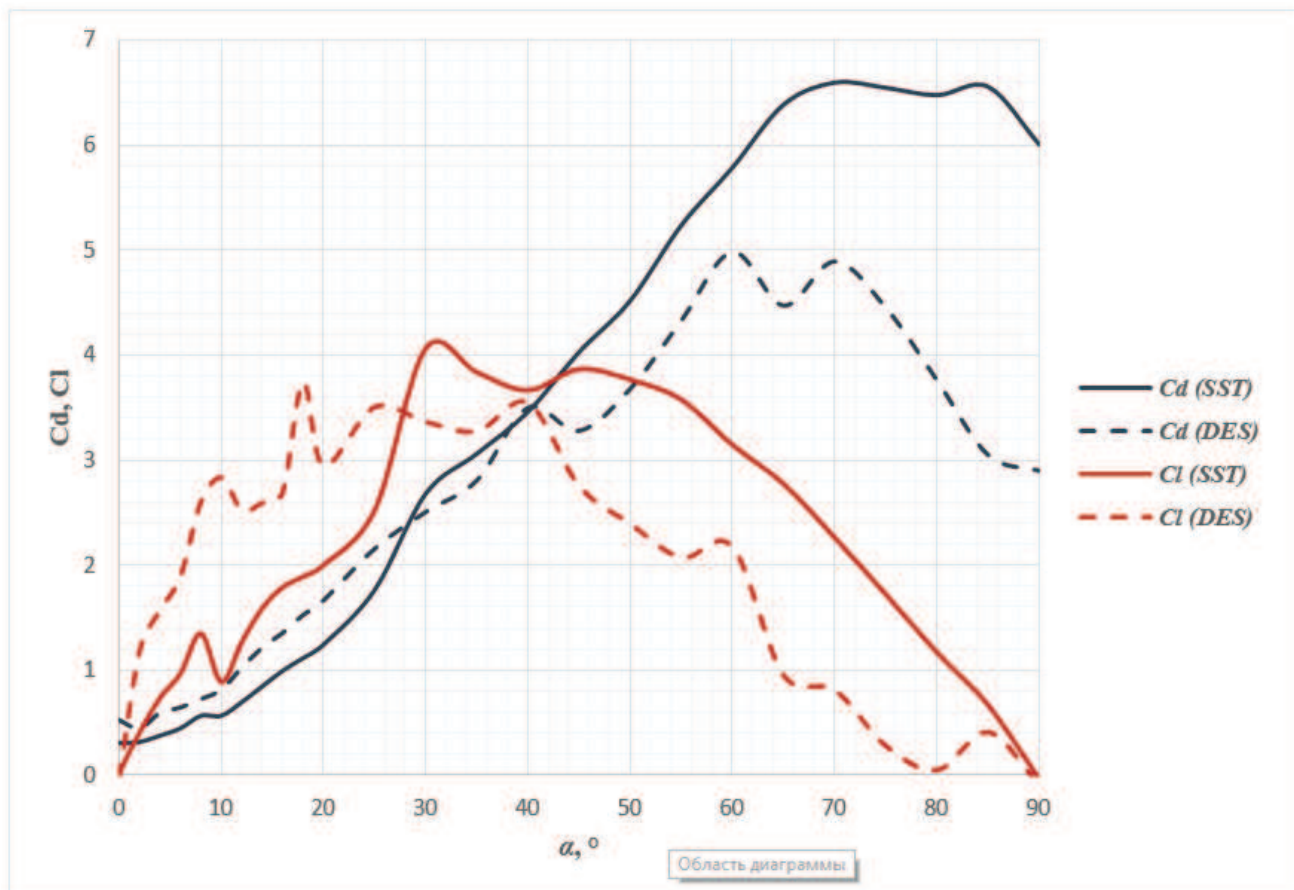


Рисунок 4. График зависимости аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления C_D и подъемной силы C_L от угла атаки α .

Далее по формуле (2.15) был вычислен критерий Глауэрта–Ден-Гартога H . В таблице 3 красным отмечены те углы, для которых выполняется критерий Глауэрта–Ден-Гартога, т.е. для этих углов возможно возникновение галопирования.

Далее из достаточного условия (2.14) находится критическая скорость, при которой возникает галопирование. Выражение для этой скорости также приводится в Eurocode [4] и имеет вид:

$$V_{CG} = \frac{2 \cdot Sc \cdot f_i \cdot B}{a_g} \quad (4.8)$$

где f_i — собственная частота i -ой формы изгибных колебаний в поперечном к направлению действия ветра направлении ($f_i = 0.13$ Гц); B — ширина сечения поперек ветрового потока ($B=2.45$ м); a_g — коэффициент неустойчивости при галопировании, равный $H \cdot k_s$, где k_s принят равным 0.9, а H — критерий Глауэрта–Ден-Гартога; Sc — число Скрудона,

Таблица 3. Значения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления C_D и подъемной силы C_L и критерий Глауэрта–Ден-Гартога H для различных углов α , °.

Угол α , °	Угол α , рад.	SST				DES			
		C_D	C_L	C'_L	H	C_D	C_L	C'_L	C_D
0	0.00	0.30	0.03	10.93	11.23	0.53	-0.03	34.61	35.14
2	0.03	0.31	0.41	10.11	10.42	0.45	1.18	22.89	23.34
4	0.07	0.37	0.74	7.98	8.35	0.60	1.57	10.18	10.79
6	0.10	0.44	0.97	8.79	9.24	0.65	1.89	14.83	15.48
8	0.14	0.56	1.35	-1.17	-0.60	0.73	2.60	13.44	14.17
10	0.17	0.56	0.89	-1.19	-0.63	0.82	2.83	-1.18	-0.36
12	0.21	0.69	1.27	10.06	10.75	1.03	2.52	-3.39	-2.36
14	0.24	0.84	1.59	7.45	8.29	1.22	2.59	2.47	3.70
16	0.28	0.99	1.79	4.26	5.25	1.36	2.69	16.52	17.88
18	0.31	1.11	1.89	3.06	4.17	1.53	3.74	3.52	5.05
20	0.35	1.24	2.00	5.19	6.43	1.67	2.94	-1.96	-0.29
25	0.44	1.76	2.52	11.81	13.57	2.16	3.50	2.43	4.59
30	0.52	2.68	4.06	7.50	10.18	2.51	3.36	-1.36	1.15
35	0.61	3.06	3.83	-2.30	0.76	2.81	3.27	1.03	3.83
40	0.70	3.46	3.66	0.17	3.63	3.50	3.54	-2.96	0.54
45	0.79	4.03	3.86	0.55	4.58	3.28	2.75	-6.61	-3.33
50	0.87	4.52	3.76	-1.69	2.83	3.68	2.39	-3.91	-0.23
55	0.96	5.24	3.57	-3.55	1.69	4.33	2.07	-1.27	3.06
60	1.05	5.79	3.14	-4.55	1.24	4.98	2.17	-6.42	-1.44
65	1.13	6.39	2.77	-5.03	1.36	4.47	0.95	-7.80	-3.33
70	1.22	6.60	2.26	-6.06	0.54	4.89	0.81	-3.85	1.04
75	1.31	6.55	1.72	-6.23	0.32	4.45	0.28	-4.35	0.10
80	1.40	6.48	1.17	-6.00	0.48	3.76	0.05	0.75	4.51
85	1.48	6.56	0.67	-6.91	-0.35	3.05	0.41	-0.78	2.27
90	1.57	6.01	-0.03	-8.01	-2.00	2.90	-0.09	-5.70	-2.80

$$S_c = \frac{2 \cdot \delta \cdot m}{\rho \cdot B^2} \quad (4.9)$$

$$V_{CG} > 1.25 \cdot V_m \quad (4.10)$$

где δ – логарифмический декремент колебаний ($\delta=0.03$); ρ – плотность воздуха ($\rho=1.185 \text{ кг/м}^3$); m – погонная масса конструкции ($m=4250 \text{ кг/м}$).

Согласно Eurocode [4] аэродинамическая неустойчивость при галопировании возникает в том случае, когда скорость ветра достигает величины, при которой начинается колебательный процесс с нарастающей амплитудой.

Для выбранных «опасных» углов атаки по формуле (4.8) определена критическая скорость начала колебательного процесса (таблица 4).

4.3. Дивергенция.

Согласно Eurocode [4], должны принципиально исключаться такие виды динамической неустойчивости как дивергенция и флаттер, возникающие, если деформации конструкции вызывают переменные аэродинамические нагрузки.

Таблица 4. Значения критерий Глауэрта–Ден-Гартога H и критической скорости V_{CG} для различных углов α , °.

Угол α , °	Угол α , рад.	SST		DES	
		H	V_{CG} , м/с	H	V_{CG} , м/с
8	0.14	-0.60	5.76	-	-
10	0.17	-0.63	5.54	-0.36	9.77
12	0.21	-	-	-2.36	1.47
20	0.35	-	-	-0.29	12.09
45	0.79	-	-	-3.33	1.04
50	0.87	-	-	-0.23	15.24
60	1.05	-	-	-1.44	2.42
65	1.13	-	-	-3.33	1.05
85	1.48	-0.35	10.09	-	-
90	1.57	-2.00	1.74	-2.80	1.25

Чтобы быть восприимчивой к дивергенции или флаттеру, конструкция должна одновременно выполнять все три условия, указанные в Eurocode [4].

Если все условия выполняются, необходимо проверить исследуемую конструкцию на возможность возникновения флаттера или дивергенции из условия:

$$V_{div} > 2 \cdot V_m \quad (4.11)$$

Критическая скорость ветра для дивергенции вычисляется по следующей формуле:

$$V_{div} = \left[\frac{2 \cdot k_{\Theta}}{\rho \cdot L^2 \cdot \frac{dc_M}{d\Theta}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

где k_{Θ} – крутильная жесткость сечения ($k_{\Theta} = 1.2 \cdot 10^4$ Нм/рад); C_M – аэродинамический коэффициент момента; $\frac{dc_M}{d\Theta}$ – производная аэродинамического коэффициента момента; ρ – плотность воздуха ($\rho = 1.185$ кг/м³); L – протяженность конструкции вдоль ветрового потока ($L = 11,9$ м).

Ниже представлены результаты расчетов, в ходе которых были определены значения аэродинамического момента CMZ при различных углах атаки (рис. 5). Далее по формуле (4.12) для всех углов была вычислена критическая скорость ветра для возникновения дивергенции (таблица 5).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многовариантные аэродинамические расчеты показали близость инженерных оценок, полученных с помощью разных моделей турбулентности. Качественное совпадение законов изменения аэродинамических коэффициентов от угла атаки, и соответственно критериальных параметров, дает возможность использовать менее требовательную к ресурсам модель k-w SST. Возможность использования стационарных расчетов для получения предварительной инженерной оценки аэродинамической устойчивости является хорошей основой для проведения исследований [6]. Тем не менее, остается необходимость развития и исследования методики прямого динамического моделирования поведения конструкции в потоке [7] для получения более достоверной картины и количественного сопоставления с инженерными оценками.

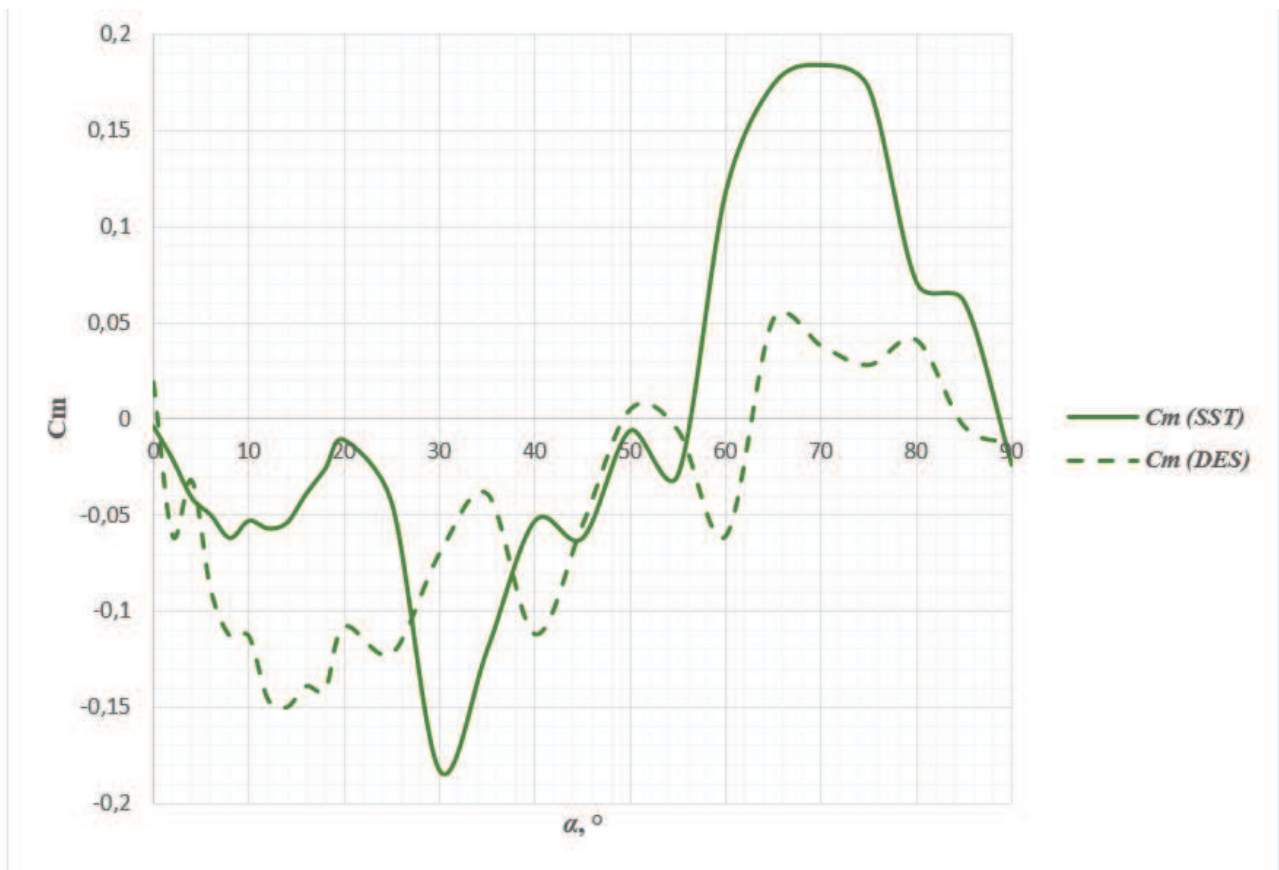


Рисунок 5. График зависимости аэродинамического коэффициента момента C_M от угла атаки α , °.

Таблица 5. Значения коэффициента аэродинамического момента C_{Mz} и значения критической скорости ветра V_{DIV} для различных углов α , °.

Угол α , °	Угол α , рад.	SST			DES		
		C_M	C'_M	V_{DIV} , м/с	C_M	C'_M	V_{DIV} , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.00	-0.004	-0.490	17.18	0.019	-2.312	7.91
2	0.03	-0.021	-0.532	16.50	-0.061	-0.736	14.03
4	0.07	-0.041	-0.419	18.58	-0.032	-0.401	19.01
6	0.10	-0.050	-0.292	22.28	-0.089	-1.156	11.19
8	0.14	-0.062	-0.042	58.67	-0.113	-0.337	20.74
10	0.17	-0.053	0.063	47.77	-0.113	-0.479	17.39
12	0.21	-0.057	-0.002	297.36	-0.146	-0.537	16.41
14	0.24	-0.054	0.264	23.42	-0.150	0.099	38.24
16	0.28	-0.039	0.400	19.03	-0.139	0.139	32.22
18	0.31	-0.026	0.401	19.00	-0.141	0.445	18.04
20	0.35	-0.011	-0.151	31.00	-0.108	0.150	31.07
25	0.44	-0.044	-0.989	12.10	-0.122	0.219	25.70
30	0.52	-0.183	-0.436	18.22	-0.070	0.474	17.47
35	0.61	-0.120	0.747	13.92	-0.039	-0.242	24.47
40	0.70	-0.053	0.333	20.84	-0.112	-0.089	40.25

1	2	3	4	5	6	7	8
45	0.79	-0.062	0.266	23.31	-0.055	0.668	14.73
50	0.87	-0.006	0.189	27.68	0.005	0.282	22.64
55	0.96	-0.029	0.715	14.23	-0.006	-0.377	19.60
60	1.05	0.118	1.161	11.16	-0.061	0.331	20.91
65	1.13	0.174	0.375	19.65	0.052	0.570	15.93
70	1.22	0.184	-0.010	122.98	0.038	-0.138	32.41
75	1.31	0.172	-0.645	14.98	0.028	0.014	101.71
80	1.40	0.071	-0.637	15.07	0.041	-0.181	28.28
85	1.48	0.061	-0.543	16.32	-0.004	-0.310	21.60
90	1.57	-0.024	0.041	59.45	-0.013	-0.002	243.83

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черный Г.Г.** Слово о вечно новой механике. – М.: МГОФ. Знание, 2011. – 52 с.
2. **Zhan H, Fang T.** Flutter stability studies of Great Belt East Bridge and Tacoma Narrows Bridge by CFD numerical simulation, the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China, 2012
3. ANSYS CFX 17.0 User's Guide. Canonsburg, 2016.
4. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2-4: «Wind action». ENV 1991 – 2 – 4, – CEN, 1994.
5. **Симиу Э., Сканлан Р.** Воздействие ветра на здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.
6. **Lantsova I., Afanasyeva I.** Investigation of Aerodynamic Instability of a Thin Plate. // MATEC Web of Conferences 117, 2017.
7. **Афанасьева И.Н.** Моделирование двумерного нестационарного обтекания гибкой упругой конструкции в связанной постановке. Часть 3: верификация методики численного моделирования связанной задачи аэрогидроупругости. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций), Volume 10, Issue 3, 2014, с. 40-48.

REFERENCES

1. **Chernyy G.G.** Slovo o Vечно Novoy Mekanike [The Word About the Eternally New Mechanics]. Moscow, MGOF. Znaniye, 2011, 52 pages.
2. **Zhan H, Fang T.** Flutter stability studies of Great Belt East Bridge and Tacoma Narrows Bridge by CFD numerical simulation, the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China, 2012
3. ANSYS CFX 17.0 User's Guide. Canonsburg, 2016.
4. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2-4: «Wind action». ENV 1991 – 2 – 4, – CEN, 1994.
5. **Simiu E., Skanlan R.** Vozdeystviye Vetra na Zdaniya i Sooruzheniya [The Impact of Wind on Buildings and Structures]. Moscow, Stroyizdat, 1984, 360 pages.
6. **Lantsova I., Afanasyeva I.** Investigation of Aerodynamic Instability of a Thin Plate. // MATEC Web of Conferences 117, 2017.
7. **Afanasyeva I.N.** Modelirovaniye Dvumernogo Nestatsionarnogo Obtekaniya Gibkoy Uprugoy Konstruktsii v Svyazannoy Postanovke. Chast 3: Verifikatsiya Metodiki Chislennogo Modelirovaniya Svyazannoy Zadachi Aerogidrouprugosti [2-D Modelling of Fluid – Structure Interaction Between an Elastic Structure and Transient Flow. Part 3: Verification of Numerical Technique of Couples Aeroelastic

Problem Simulation]. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitelnykh konstruktсий), Volume 10, Issue 3, 2014, pp. 40-48.

Ланцова Ирина Юрьевна, ассистент и аспирант кафедры прикладной математики, инженер Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов Национального исследовательского Московского строительного университета, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, тел./факс: +7(499)183-59-94; E-mail: niccm@mgsu.ru

Афанасьева Ирина Николаевна, кандидат технических наук, ведущий инженер-расчетчик ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ «СтаДиО»); магистрант Флоридского университета (США); 125040, Россия, г. Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, 8 этаж, офис 810, тел. +7 (495) 706-88-10, E-mail: stadyo@stadyo.ru.

Irina Yu. Lantsova, assistant postgraduate of Department of Applied Mathematics, engineer of Research & Education Center of Computation Simulation; National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, Russia; tel./fax: +7 (499)183-59-94; e-mail: niccm@mgsu.ru

Irina N. Afanasyeva, Ph.D., senior engineer of Scientific Research Center StaDyO; Master's Degree Student, University of Florida (USA); 125040, Russia, Moscow, ul. 3-ya Yamskogo Polyа, 18, 8 floor, office 810, tel. +7 (495) 706-88-10, e-mail: stadyo@stadyo.ru.