

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/13SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/13SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/13SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шустикова А.А., Козичев А.В., Парышев С.Э., Стрелков К.С. Расчетные исследования аэроупругой устойчивости пролетного строения моста через р. Обь в г. Салехард на стадии монтажа и эксплуатации // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/13SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13SATS319

For citation:

Shustikova A.A., Kozichev A.V., Paryshev S.E., Strelkov K.S. (2019). Calculated research of aeroelastic stability of a bridge over the river Ob in Salekhard at the stage of assembling and operation. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/13SATS319

УДК 624.21/.8

ГРНТИ 67.11.35

Шустикова Анастасия Андреевна

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Инженер
E-mail: shustic09@gmail.com

Козичев Андрей Валерьевич

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Инженер 1-й категории
E-mail: andreikozechev@mail.ru

Парышев Сергей Эмильевич

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Начальник отделения аэроупругости и норм прочности
Кандидат технических наук
E-mail: sergei.paryshev@tsagi.ru

Стрелков Константин Сергеевич

ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия
Заместитель начальника отделения
E-mail: kssstrel36@mail.ru

Расчетные исследования аэроупругой устойчивости пролетного строения моста через р. Обь в г. Салехард на стадии монтажа и эксплуатации

Аннотация. В настоящее время возникает большая потребность в строительстве мостовых сооружений большой протяженности для развития регионов России. С экономической точки зрения целесообразно сооружать совмещенные автодорожно-железнодорожные мосты. Такие мосты, как правило, представляют собой металлическую сквозную ферму с ездой по нижнему, верхнему или обоим поясам фермы. Преимуществом таких мостов является высокая прочность и несущая способность, а также прозрачность для ветрового потока. С целью усиления экономического развития Ямало-Ненецкого автономного

округа принято решения о строительстве совмещенного моста. Объектом исследования является сооружаемое пролётное строение совмещенного моста (железнодорожного и автодорожного) через р. Обь в г. Салехарде.

Целью работы является определение границ аэроупругой устойчивости пролетного строения совмещенного моста через р. Обь в г. Салехард на стадии монтажа и эксплуатации методом численного моделирования.

Методом численного моделирования на отсечной модели исследовано обтекание набегающим воздушным потоком совмещенного моста на стадии монтажа и эксплуатации. По результатам расчетов получены зависимости уровня колебаний руслового пролёта совмещенного моста от скорости ветра в заданном диапазоне, а также значения коэффициентов лобового сопротивления C_x , подъемной силы C_y и крутящего момента M_z . Расчетные исследования проводились в диапазоне углов атаки ветрового потока $\alpha = \pm 3^\circ$. Проведена оценка возможности возникновения дивергенции и галопирования.

Результаты расчетных исследований позволили оценить влияние воздушного потока на сквозную ферму совмещенного моста. В целом, проведенное исследование является многообещающим для дальнейшего изучения и разработок в области аэроупругости мостов.

Ключевые слова: аэроупругая устойчивость; совмещенный мост; пролетное строение; вихревое возбуждение; вертикальные колебания; кручение; галопирование; дивергенция; компьютерное моделирование

Введение

С целью усиления экономического развития Ямало-Ненецкого автономного округа принято решения о строительстве совмещенного автодорожно-железнодорожного моста через реку Обь. Проведенный анализ отечественных и зарубежных научных работ показал, что поведение совмещенных мостов изучено недостаточно. Поэтому для принятия решения об аэродинамической устойчивости пролетного строения, решено провести расчетные исследования.

Объектом расчетных исследований являлся совмещенный автодорожный и железнодорожный мост через реку Обь в районе города Салехард. В работе рассмотрены такие виды аэроупругой неустойчивости как явления вихревого возбуждения, дивергенции и галопирования.

1. Создание математической модели расчетных исследований

Пролетное строение представляет собой металлическую сквозную неразрезную ферму с двумя пролетами по 176 метров. В верхнем поясе обустроена ортотропная плита для пропуска автомобилей в две полосы. В нижнем поясе устроен однопутный проезд железнодорожного состава по безбалластным железобетонным плитам (рисунок 1).

Расчеты ветрового воздействия проводились в плоскости, перпендикулярной к продольной оси моста, при этом трехмерная картина течения заменена двумерной, соответствующей обтеканию «отсечной» модели [1]. Для создания математической модели и расчетной области использовался чертеж поперечного сечения. Раскосы сквозной фермы и поперечные ветровые связи пролетного строения в расчётной аэродинамической модели отсутствуют.



Рисунок 1. Математическая модель поперечного сечения пролетного строения на стадии монтажа (слева) и на стадии эксплуатации (справа) (разработано автором)

Математическая модель моста помещена в расчетную область, пространство в расчетной области заполнено неструктурированной конечно-разностной сеткой. Для большей точности расчета вблизи поверхности модели моста применяется сгущение сетки. Переход к двумерной отсечной модели позволяет сократить время расчета без существенной потери точности получаемых результатов.

Обтекание отсека моста моделировалось при постоянном набегающем потоке скоростью 20 м/с при различных углах атаки. Расчет параметров потока, сил и моментов, действующих на неподвижную отсечную математическую модель моста, проводился в ПК ANSYS FLUENT на основе осредненных по числу Рейнольдса уравнениях Навье-Стокса. Для определения нестационарного обтекания применена дифференциальная модель турбулентности «ShearStressTransport» [2; 3].

2. Методика расчета скорости и амплитуды вихревого возбуждения

В работе исследовано явление динамической неустойчивости типа вихревого возбуждения, возникающей при совпадении частоты сходящихся вихрей с частотой собственных колебаний конструкции в вертикальной плоскости [4]. Оценка критической скорости ветра при вихревом возбуждении проведена единообразно для стадии монтажа и для стадии эксплуатации моста.

Результаты расчетов, проведенных на неподвижном отсеке моста, использованы для оценки величины критической скорости набегающего потока, при которой возможно вихревое возбуждение. В результат входят значения вертикальной аэродинамической силы, крутящего момента и их коэффициентов в каждый момент времени с шагом 0,01 сек. [5]. Изменение вертикальной аэродинамической силы и крутящего момента по времени рассматривалось на установившемся режиме колебаний, то есть при периодической зависимости силы от времени. На основе установившегося спектра частот подъемной силы и момента, действующих на отсек, исследован амплитудный спектр (рисунок 2) [6].

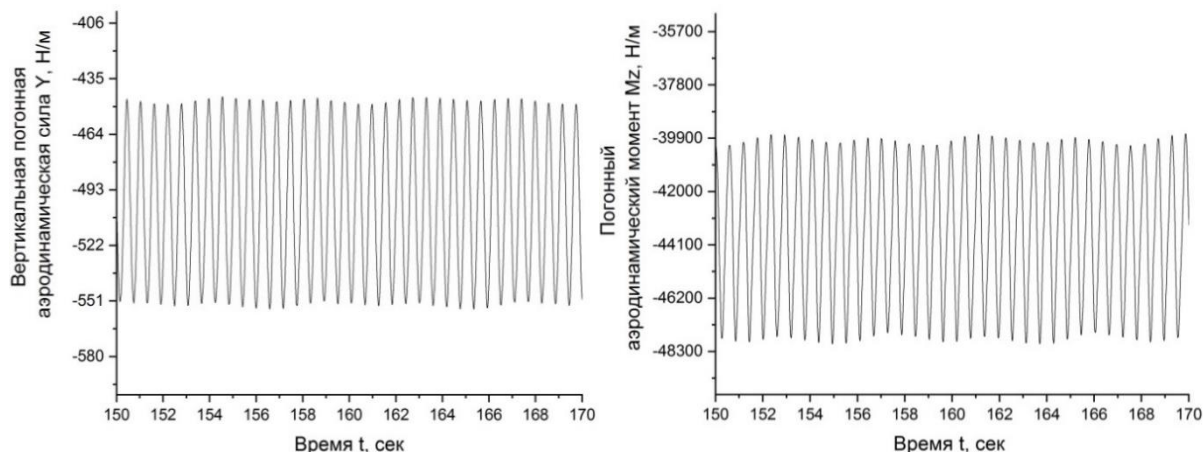


Рисунок 2. Пример зависимости пульсирующей вертикальной силы и крутящего момента от времени, действующих на отсек моста при скорости ветра 20 м/с (разработано автором)

Для получения амплитудных спектров используется алгоритм быстрого преобразования Фурье [7]. Амплитудный спектр подъемной силы и крутящего момента в турбулентном потоке при $V = 20$ м/с на стадии монтажа и на стадии эксплуатации приведен на рисунках 3–4.

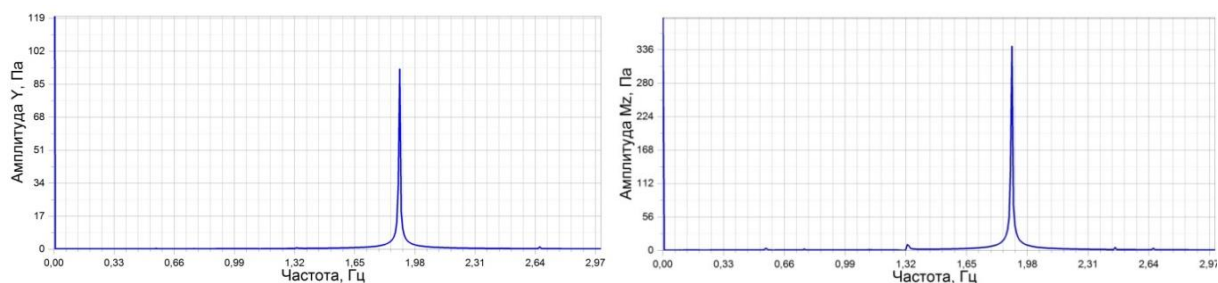


Рисунок 3. Амплитудный спектр аэродинамической подъемной силы и крутящего момента на стадии монтажа ($V = 20$ м/с, $\alpha = 0^\circ$) (разработано автором)

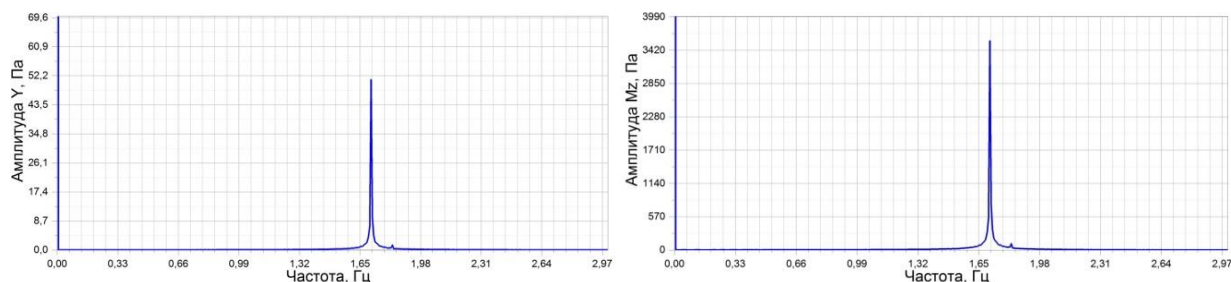


Рисунок 4. Амплитудный спектр аэродинамической подъемной силы и крутящего момента на стадии эксплуатации ($V = 20$ м/с, $\alpha = 0^\circ$) (разработано автором)

Из амплитудно-частотного анализа вертикальной аэродинамической силы и крутящего момента при скорости потока 20 м/с следует, что частота пульсаций силы и момента совпадают. Зная частоту пульсации силы и момента, определена предполагаемая критическая скорость вихревого возбуждения конструкции на стадии монтажа и эксплуатации. Для пересчета критической скорости ветра использовано подобие по числу Струхалия Sh [4; 8]:

$$V_{кр}^i = V_0 * \frac{f_{cob}^i}{f_0} \quad (1)$$

где: $V_{кр}^i$ – критическая скорость вихревого возбуждения для i -формы, м/с;

V_0 – заданная скорость при расчете, м/с;

$f_{соб}$ – частота собственных колебаний по i -ой форме, Гц;

f_0 – частота пульсаций аэродинамической силы/крутящего момента, Гц.

Поведение пролетного строения под действием периодической вертикальной аэродинамической силы $Y(t)$ и момента $M(t)$ описывается с помощью уравнений вынужденных колебаний вблизи резонанса [8; 9]:

$$\ddot{y} + \delta \frac{\omega_{изг}}{\pi} \dot{y} + \omega_{изг}^2 y = \frac{Y(t)}{m_e} \quad (2)$$

$$\ddot{\varphi} + \delta \frac{\omega_{круч}}{\pi} \dot{\varphi} + \omega_{круч}^2 \varphi = \frac{M(t)}{J_e} \quad (3)$$

где: y – вертикальное смещение отсека пролетного строения, м;

δ – конструкционный декремент изгибных и крутильных колебаний, $\delta = 0,02$;

$\omega_{изг}$ – круговая частота изгибных колебаний, Гц;

m_e – эквивалентная масса единичной длины отсечной модели, кг/м;

$Y(t)$ – вертикальная аэродинамическая сила, действующая на отсечную модель единичной длины, Па;

φ – угол поворота отсека относительно оси жесткости, град;

$\omega_{круч}$ – круговая частота крутильных колебаний, Гц;

J_e – эквивалентный момент инерции относительно оси жесткости, кг·м²;

$M(t)$ – аэродинамический момент, действующий на отсечную модель относительно оси жесткости, Па.

В реальном случае вихревое возбуждение возникает в узком диапазоне совпадения частот. Для этого уравнения вынужденных колебаний (2) и (3) решены численным методом. Дифференциальные уравнения интегрируются по времени с шагом 0,01 секунда в течение 200 секунд с помощью метода Эйлера. Эти уравнения проинтегрированы независимо, так как ось жесткости и центр масс отсека не имеют горизонтального смещения относительно друг друга. Для определения эквивалентной массы m_e и эквивалентного момента инерции J_e использована стандартная методика, которая позволяет перейти от изгибных колебаний пролетного строения к вертикальным колебаниям отсека с той же частотой (Eurocode 1: Actionsonstructures. Part 1–4: Generalactions – Windactions).

3. Результаты численного моделирования вихревого возбуждения

С помощью численного интегрирования уравнений (2) и (3) получена зависимость амплитуды изгибных и крутильных колебаний от скорости набегающего потока в заданном диапазоне до 33,12 м/с (таблица 1, рисунки 5–6). Максимальная амплитуда колебаний достигается при критической скорости вихревого возбуждения.

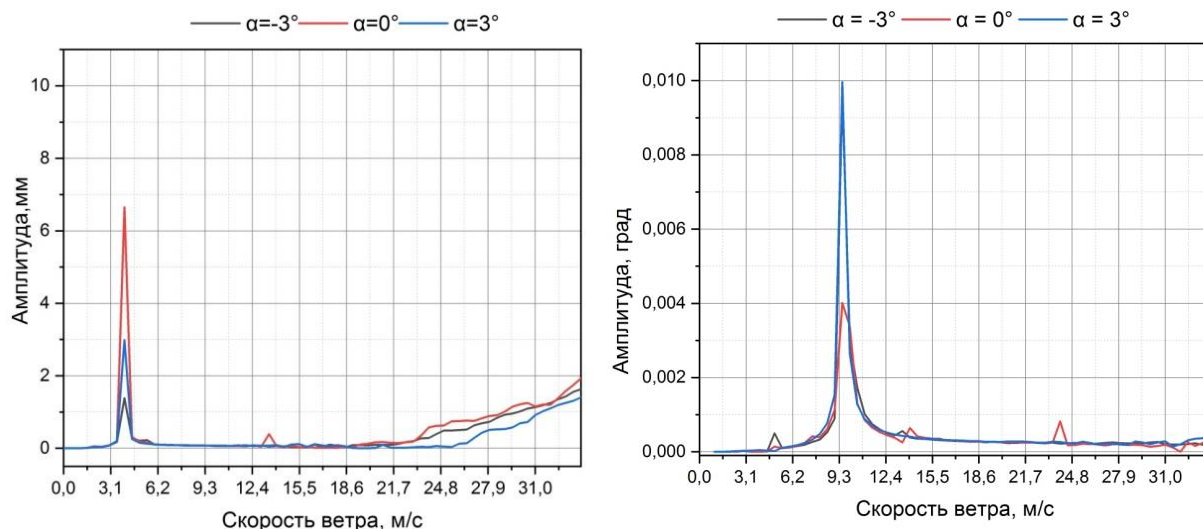


Рисунок 5. Зависимость амплитуды изгибных и крутильных колебаний пролетного строения от скорости и угла атаки для стадии монтажа (разработано автором)

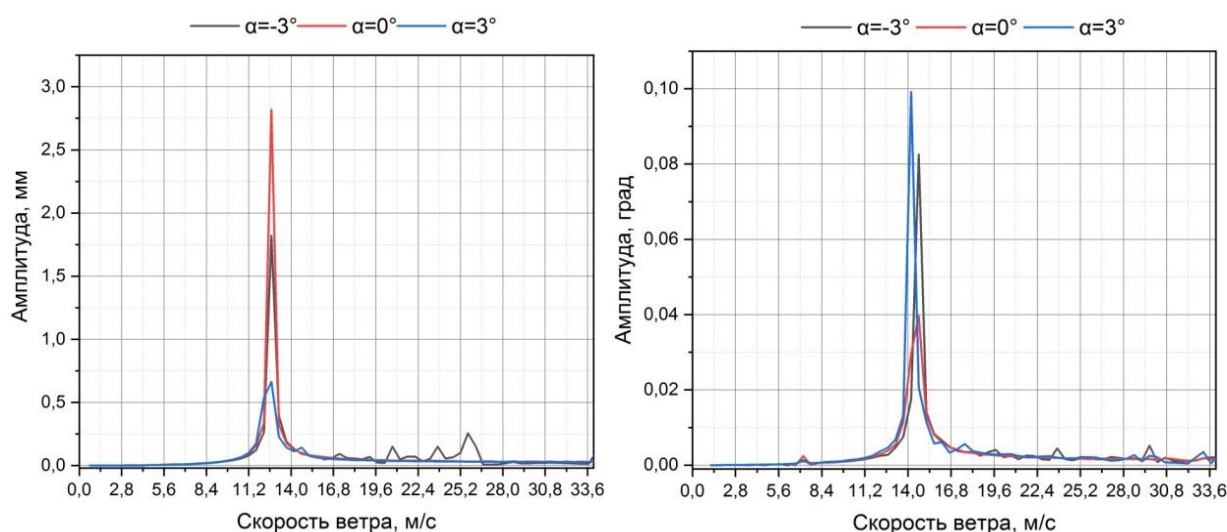


Рисунок 6. Зависимость амплитуды изгибных и крутильных колебаний пролетного строения от скорости и угла атаки для стадии эксплуатации (разработано автором)

Таблица 1

Амплитуды изгибных и крутильных колебаний пролетного строения в зависимости от скорости и угла атаки для стадии монтажа

	Угол атаки α , град	-3	0	3	$V_{кр}$, м/с
Стадия монтажа	$A_{изг}$, мм	4.18	4.29	4.22	12.7
	$A_{круч}$, град	0.028	0.044	0.055	14.6
Стадия эксплуатации	$A_{изг}$, мм	8.55	9.98	9.34	4
	$A_{круч}$, град	0.005	0.0052	0.007	9.7

Составлено автором

4. Оценка возможности возникновения дивергенции и галопирования

Также по результатам расчетов получены динамические значения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления C_x , подъемной силы C_y и крутящего момента M_z .

Коэффициенты аэродинамических сил и момента определялись в системе координат, расположенной в центре масс модели, по следующим формулам (4) [10]:

$$C_x = \frac{X}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad C_y = \frac{Y}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad m_z = \frac{M}{\frac{\rho V^2}{2} SB}, \quad (4)$$

где: X – горизонтальная аэродинамическая сила в направлении оси x , Па;

Y – вертикальная аэродинамическая сила в направлении оси y , Па;

M – аэродинамический момент относительно оси z , Па;

V – скорость ветра, м/с;

ρ – плотность воздуха (1,225 кг/м³);

B – характерный линейный размер, ширина поперечного сечения;

S – характерная площадь, $S = B \cdot l$ (м), м².

На основе значений коэффициентов проведена оценка возможности возникновения явления аэродинамической неустойчивости типа галопирования и дивергенции.

Для явления галопирования определяющим параметром является критерий Ден-Гартога. Конструкция является устойчивой при положительном значении этого критерия [11–12]:

$$C_y^\alpha + C_x > 0 \quad (5)$$

где: C_y^α – производная коэффициента вертикальной аэродинамической силы по углу атаки;

C_x – коэффициент горизонтальной аэродинамической силы.

Условием устойчивости положения равновесия при дивергенции является отрицательное значение производной крутящего момента по углу атаки α [11–12]:

$$\frac{dm_z}{d\alpha} = m_z^\alpha < 0 \quad (6)$$

где: m_z^α – производная коэффициента аэродинамического момента по углу атаки.

Критерий устойчивости Ден-Гартога, рассчитанный по формуле (5), положителен для всех заданных углов атаки, следовательно, явление галопирования не наблюдается для стадии монтажа и эксплуатации.

По результатам проведенных расчетов производная коэффициента крутящего момента имеет отрицательное значение на всех исследуемых углах атаки α . Следовательно, согласно формуле (6), явление дивергенции не проявляется на стадии монтажа и эксплуатации.

5. Визуализация картин обтекания сечения моста

При численном моделировании обтекания ветровым потоком отсечной модели моста на стадии монтажа и на стадии эксплуатации получены картины линий тока вблизи поверхности и визуализация интенсивности турбулентности (рисунки 7, 8).

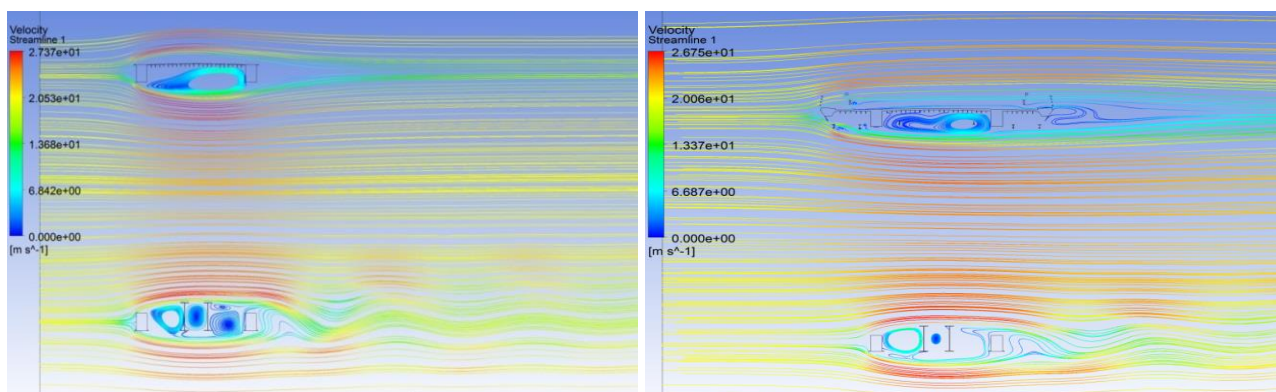


Рисунок 7. Линии тока около отсечной модели на стадии монтажа и на стадии эксплуатации при $V = 20$ м/с, $\alpha = 0^\circ$ (разработано автором)

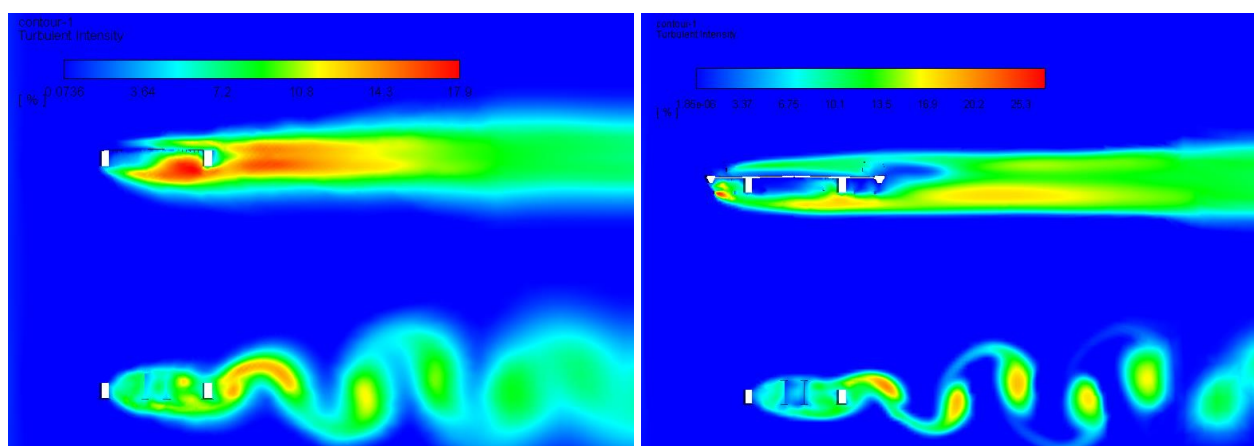


Рисунок 8. Интенсивность турбулентности около отсечной модели на стадии монтажа и на стадии эксплуатации при $V = 20$ м/с, $\alpha = 0^\circ$ (разработано автором)

Анализ полученных картин линий тока и турбулентности (рисунок 7–8) показал, что при обтекании конструкции в уровне нижнего пояса сквозной металлической фермы совмещенного моста наблюдается образование дорожки сходящих вихрей, как на стадии монтажа, так и на стадии эксплуатации. В рассмотренном скоростном диапазоне на всех исследуемых углах α только нижний пояс является источником пульсирующей аэродинамической силы. В то время как в уровне верхнего пояса под полотном проезжей части образуется зона пониженного давления, которая обеспечивает отрицательный коэффициент подъемной силы.

Выводы

Проведено расчетное исследование обтекания воздушным потоком математической модели совмещенного моста через р. Обь в г. Салехард на стадии монтажа и эксплуатации. По вышеуказанным результатам можно сделать вывод, что пролетное строение совмещенного моста через р. Обь у г. Салехард на стадии монтажа и эксплуатации устойчиво к ветровым нагрузкам в диапазоне скорости ветра от 0 до 33,12 м/с и угла атаки от -3 до $+3$ градусов.

Данное расчётное исследование может стать определяющим для будущих задач в области строительства совмещенных пролетных строений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаров, Ю.А. Моделирование в АДТ ЦАГИ аэроупругих колебаний мостовых конструкций при воздействии ветра и разработка средств обеспечения их безопасности / Ю.А. Азаров, Е.В. Брускова, М.С. Комаров, В.В. Назаренко, К.С. Стрелков, Л.Л. Теперин – Труды ЦАГИ выпуск 2729. – 2013.
2. Davidson, L. An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics // L. Davidson / Chalmers University of Technology, Publication 97/2, Sweden. – 2003.
3. Kai Fan Liaw Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD // Kai Fan Liaw / University of Nottingham, 2005. – 269 p.
4. Комаров, М.С. О ветровой устойчивости мостовых конструкций // М.С. Комаров, В.В. Назаренко, К.С. Стрелков, Л.Л. Теперин / ДОРОГИ. Инновации в строительстве, 2011. – №10. – С. 28–30.
5. Гарифуллин, М.Ф. Динамика и аэроупругость тонкостенных конструкций // М.Ф. Гарифуллин / Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 315 с.
6. Стрелков, С.П. Введение в теорию колебаний / С.П. Стрелков – М.: Наука, 1964. – 437 с.
7. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / Сергиенко А.Б. – СПб.: «Питер», 2002. – 608 с.
8. Фершинг, Г.В. Основы аэроупругости / Фершинг Г.В. – М.: Машиностроение, 1984. – 600 с.
9. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Симиу Э., Сканлан Р. – Пер с англ.; под ред. Маслова Б.Е. – М.: Стройиздат, 1984. – 358 с.
10. Дмитриев, В.Г. Основы прочности и проектирование силовой конструкции летательных аппаратов / В.Г. Дмитриев, В.М. Чижов – М.: 2005. – 416 с.
11. Казакевич, М.И. Аэродинамика мостов / М.И. Казакевич – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
12. Казакевич, М.И. Ветровая безопасность конструкций. Теория и практика / М.И. Казакевич – М., 2015. – 287 с.

Shustikova Anastasiya Andreevna

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: shustic09@gmail.com

Kozichev Andrei Valerievich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: andreikozichev@mail.ru

Paryshev Sergei Emilevich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: sergei.paryshev@tsagi.ru

Strelkov Konstantin Sergeevich

The central aerohydrodynamic institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia
E-mail: ksstrel36@mail.ru

Calculated research of aeroelastic stability of a bridge over the river Ob in Salekhard at the stage of assembling and operation

Abstract. Recently, long span bridge construction has been demanded for development of the regions of the Russian Federation. In terms of economy, it's useful to build a combined road-railway bridge. Such bridges, generally, constitute a metal cross-cutting girder with carriageways on lower, upper or both zones of the girder. The major advantages of combined bridges are high strength and load capacity, plus cross-cutting to wind load. Focus of this research is a combined road-railway bridge over the Ob river at the stage of assembling and operation.

The purpose of the study was to determine the limits of aeroelastic stability of combined road-railway bridge at the stage of assembling and operation using numerical simulation.

To better understand the bridges behaviour in air flow, flow around a section model has been researched with CFD simulation in the ANSYS FLUENT. Then based on the given results of the calculations the dependence of the bridge vibrations on wind speed within a specified range is obtained, and also values of drag coefficient C_x , lift coefficient C_y and torque coefficient M_z are received. These studies were carried out in the range of angles of attack $\alpha = \pm 3^\circ$. The possibility of divergence and galloping was also estimated.

The results of the study made it possible to estimate the influence of air flow on combined bridge cross-cutting girder. Overall, the conducted research seems promising for further investigation and development in the field of bridge aeroelasticity.

Keywords: aeroelastic stability; bridge aeroelasticity; fluid-structure interaction; CFD; vortex shedding; divergence; galloping; computer modeling; combined bridge; two span bridge; vertical oscillation; torsion

REFERENCES

1. Azarov Yu.A., Bruszkova E.V., Komarov M.S., Nazarenko V.V., Strelkov K.S., Teperin L.L. (2013). Modeling in TsAGI ADT of aeroelastic vibrations of bridge structures under the influence of wind and development of means to ensure their safety. *Transactions of TsAGI*, 2729 (in Russian).
2. Davidson L. (2003). An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics. *Chalmers University of Technology*, 97(2).
3. Kai Fan Liaw (2005). *Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD*. University of Nottingham, p. 269.
4. Komarov M.S., Nazarenko V.V., Strelkov K.S., Teperin L.L. (2011). On the wind stability of bridge structures. *Roads. Building Innovation*, 10, pp. 28–30 (in Russian).
5. Garifullin M.F. (2003). *Dinamika i aehrouprugost' tonkostennykh konstruktsiy. [Dynamics and aeroelasticity of thin-walled structures.]* Kazan: Publishing House of Kazan State Technical University, p. 315.
6. Strelkov S.P. (1964). *Vvedenie v teoriyu kolebaniy. [Introduction to Oscillation Theory.]* Moscow: Science, p. 437.
7. Sergienko A.B. (2002). *Tsifrovaya obrabotka signalov. [Digital signal processing.]* Saint Petersburg: "Peter", p. 608.
8. Fershing G.V. (1984). *Osnovy aehrouprugosti. [The basics of aeroelasticity.]* Moscow: Engineering, p. 600.
9. Simiu Eh., Skanlan R. (1984). *The impact of wind on buildings and structures.* [Russ. ed.: *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya.* Ed. by B.E. Maslov. Moscow: Stroyizdat, p. 358.]
10. Dmitriev V.G., Chizhov V.M. (2005). *Osnovy prochnosti i proektirovanie silovoy konstruktsii letatel'nykh apparatov. [The basics of strength and design of the power structure of aircraft.]* Moscow, p. 416.
11. Kazakevich M.I. (1987). *Aehrodinamika mostov. [Aerodynamics of bridges.]* Moscow: Transport, p. 240.
12. Kazakevich M.I. (2015). *Vetrovaya bezopasnost' konstruktsiy. Teoriya i praktika. [Wind safety designs. Theory and practice.]* Moscow, p. 287.