

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-4>

Влияние трафика на аэродинамическую устойчивость большепролетных мостов



Ольга ПОДДАЕВА



Алексей ЛОКТЕВ



Павел ЧУРИН



Анастасия ФЕДОСОВА

Ольга Игоревна Поддаева¹, Алексей Алексеевич Локтев², Павел Сергеевич Чурин³, Анастасия Николаевна Федосова⁴

^{1, 3, 4} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0003-1969-6696; Web of Science Researcher ID: H-1030-2019; Scopus Author ID: 56002141900; РИНЦ SPIN-код: 4857-5428; РИНЦ Author ID: 410581.

² ORCID 0000-0002-8375-9914; Web of Science Researcher ID: W-1762-2017; Scopus Author ID: 35618959900; РИНЦ SPIN-код: 5766-6018; РИНЦ Author ID: 16528.

³ ORCID 0000-0003-1509-6108; Web of Science Researcher ID: AAD-1005-2022; Scopus Author ID: 56002171000; РИНЦ SPIN-код: 4017-7152; РИНЦ Author ID: 690208.

⁴ ORCID 0000-0002-2339-0289; Web of Science Researcher ID: S-2955-2016; Scopus Author ID: 56001803200; РИНЦ SPIN-код: 1503-9064; РИНЦ Author ID: 676314.

✉ aaloktev@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

Ветровые воздействия на большепролетные мосты при определенных условиях могут вызывать явления аэроупругой неустойчивости. В настоящее время основным методом исследования таких конструкций на возникновение явлений аэроупругой неустойчивости является экспериментальное моделирование в аэродинамических трубах.

Экспериментальное моделирование основано на предположении о неизменности формы поперечного сечения моста с течением времени. Очевидно, что такое предположение не может быть верным, поскольку наличие транс-

портных средств на мостовой конструкции изменяет профиль поперечного сечения моста. В связи с этим крайне важно выяснить, является ли обоснованным игнорирование изменения профиля поперечного сечения мостов из-за наличия транспортного потока. Настоящее исследование направлено на то, чтобы путем экспериментального моделирования в аэродинамических трубах получить представление о влиянии на аэродинамическую устойчивость моста изменений его поперечного сечения из-за наличия трафика.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, большепролетные мосты, устойчивость мостов, трафик, ветровые воздействия, аэродинамические трубы.

Финансирование: данная работа была поддержана грантом 2024 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами НИУ МГСУ, проект № 01–392/130.

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Головного регионального центра коллективного пользования и уникальной научной установки «Большая исследовательская градиентная аэродинамическая труба НИУ МГСУ».

Для цитирования: Поддаева О. И., Локтев А. А., Чурин П. С., Федосова А. Н. Влияние трафика на аэродинамическую устойчивость большепролетных мостов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-4>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

При классическом анализе мостовых конструкций на явления аэроупругой неустойчивости с использованием как экспериментального, так и численного моделирования автомобильный трафик обычно игнорируется [1–5]. Под трафиком понимается расположение автомобильного или железнодорожного транспорта на пролетном строении. Очевидно, что такой подход значительно облегчает исследование аэродинамики большепролетных мостов. Если же учитывать трафик на мостах, профиль поперечного сечения моста будет постоянно меняться из-за движущегося транспортного потока. В результате измененные профили поперечных сечений моста вдоль пролетного строения будут существенно отличаться даже в одно и то же время, кроме того, профили также будут меняться из-за дорожной и ветровой обстановки в различные моменты времени. Из-за этого существенным представляется вопрос, является ли обоснованным игнорирование изменения профиля поперечного сечения мостов из-за наличия транспортного потока.

По сравнению с исследованиями влияния трафика как внешней динамической нагрузки на мост, исследования влияния изменения профилей поперечного сечения моста на аэродинамическое поведение конструкций встречаются довольно редко.

Авторы [6] провели серию экспериментов в аэродинамической трубе для изучения влияния стохастического трафика на производные флаттера. Протестировано несколько сценариев для получения представления об изменениях производных флаттера на разных участках моста и в разные моменты времени. В работе [7], посвященной влиянию на аэродинамические характеристики конструкции изменения профиля моста из-за наличия транспортного потока, авторы, проведя экспериментальное моделирование, показали, что изменение поперечного сечения моста из-за наличия трафика может существенно повлиять на аэроупругие свойства большепролетных мостов. В работе [8] исследовано изменение аэродинамических и аэроупругих характеристик моста, обусловленных неподвижными транспортными средствами при различном расположении транспортных средств на мостовом полотне. Установлено, что для системы с двумя степенями свободы неподвижные транспортные средства доволь-

но благотворно влияют на устойчивость моста. В работе [9] изучается ветровая нагрузка на железнодорожный мост, входящий в состав высокоскоростной магистрали. Авторы пришли к качественному заключению о неизменных флуктуациях коэффициентов аэродинамического сопротивления системы «пролетное строение» – «транспортные средства» для различных сочетаний совокупности положений экипажей на мостовом переходе, в том числе, и для высокоскоростных магистралей.

Одной из решаемых в данной работе *задач*, является исследование влияния плотности транспортного потока и местоположения отдельных экипажей на пролетном строении на аэродинамическое поведение большепролетных мостов.

С этой *целью* для двух различных моделей большепролетных мостовых переходов была проведена серия *экспериментов* в аэродинамической трубе в нескольких постановках: отсутствие транспортных средств на конструкции (классическая постановка) и наличие автомобильного трафика, приводящего к изменению поперечного сечения моста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объект исследования № 1

Постановка задачи

В качестве объекта исследования выбрано пролетное строение длиной 265,41 м (рис. 1).

Методика проведения аэродинамических экспериментальных исследований

Согласно отечественным нормативным документам¹ проверка аэродинамической устойчивости для такой конструкции должна быть проведена с помощью экспериментального моделирования в аэродинамических трубах. В настоящее время в зависимости от размеров и основных целей испытаний мировым сообществом ветроэнергетики и промышленной аэродинамики IAWE (*International Associations for Wind Engineering*) официально приняты два способа исследования ветрового воздействия на мостовые конструкции:

1. Испытания секционных (отсечных) моделей пролетных строений;

¹ Свод правил СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849>. Доступ 05.05.2024.



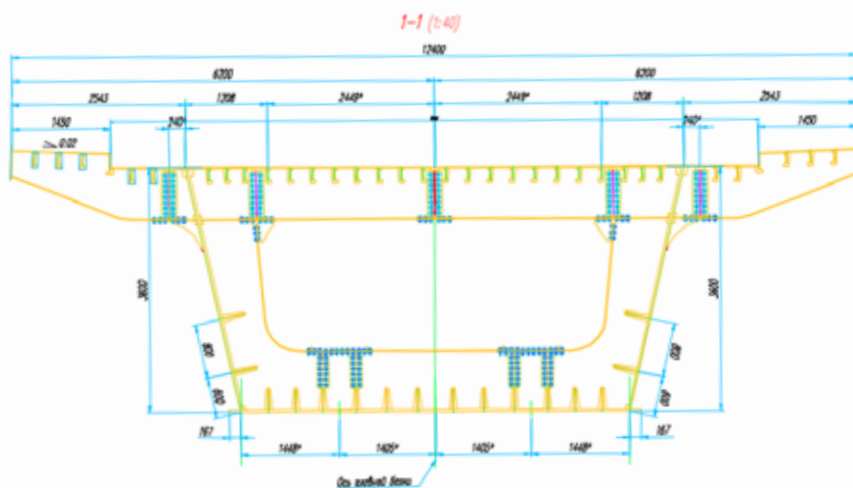


Рис. 1. Схема поперечного сечения моста № 1 [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

2. Испытания полномасштабных моделей [10].

Проведение натурных экспериментов в аэродинамических трубах связано с рядом прямых и косвенных ограничений, к которым относится использование полномасштабных макетов, что обусловлено геометрическими, финансовыми и временными аспектами проведения такого вида работ. Хотя создание полномасштабных моделей объекта может позволить получить полную достоверную информацию о фактическом состоянии и поведении конструкции при аэродинамических воздействиях, ввиду необходимости точного воспроизведения массо-инерционных и частотных параметров мостового сооружения изучение явлений аэроупругой неустойчивости связано со сложностью масштабирования моделей и интерпретацией результатов, получаемых после эксперимента² [11–16]. В процессе моделирования важным является возможность варьирования широкого спектра параметров модели, поскольку при проведении научно-технического сопровождения проектирования мостового перехода конструктивные и иные инженерные решения могут меняться [10]. Испытания пролетных строений мостовых переходов в аэродинамических трубах предлагается проводить в виде жестких секций, геометрически подобных реальной конструкции, обладающих тремя степенями свободы и подвешенных в рабочей

зоне трубы в шестикоординатной системе. Такое модельное представление позволяет достаточно точно воспроизводить реальные аэродинамические эффекты в лабораторных условиях: различные виды аэродинамических потоков, изменение скорости ветра по высоте, варьирование интенсивности ветрового потока, различные углы атаки, вертикальные и горизонтальные пульсации нагрузки, визуализацию распределения ветровых потоков по окрестностям продуваемой конструкции и т. д. [10].

Секционные испытания являются наиболее распространенным методом исследования. Данный метод целесообразно использовать для балочных мостов при отсутствии высотных пилонов и необходимости учета воздействия вантовой системы на пролетное строение.

При проведении испытаний секционной модели моделируется участок наиболее длинного пролета моста как самого восприимчивого к динамическому ветровому воздействию. Практический опыт проведения экспериментов в аэродинамических трубах, а также требования нормативных документов позволяют утверждать, что для наиболее точного моделирования необходимо секционную модель пролетного строения изготавливать абсолютно жесткой, а упругие характеристики моделировать с помощью пружинных подвесов на специализированном стенде-столе. Подробные требования были ранее описаны в ОДМ 218.2.040–2014 «Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных

² Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council of Italy. CNR-DT 207/2008. [Электронный ресурс]: <https://www.cnr.it/it/node/2627>. Доступ 05.05.2024.

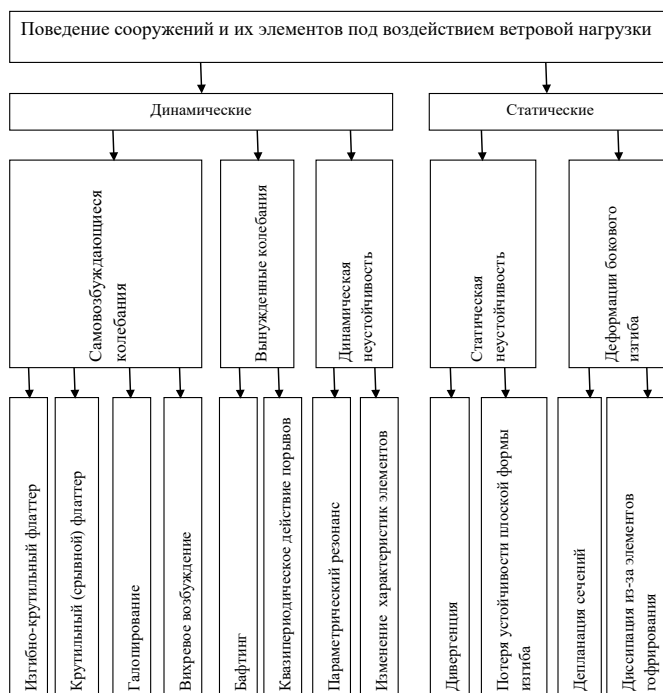


Рис. 2. Классификация аэроупругих явлений М. И. Казакевича [10] [диаграмма выполнена А. А. Локтевым].

строений мостов»³. В настоящее время действует ГОСТ Р 59625–2022, национальный стандарт Российской Федерации «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости»⁴. Неуказанные в данном документе особенности отрабатываются и в дальнейшем учитываются путем эмпирического варьирования характеристик при начале обдувки макета.

Аэродинамические воздействия, как и любую другую нагрузку, принято разделять на статические и динамические, в их основе лежат аэродинамические силы и силы упругости (флаттер, бафтинг), одной из дополнительных причин появления динамических воздействий являются силы инерции.

³ ОДМ 218.2.040-2014 «Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов». Утверждены распоряжением Федерального дорожного агентства от 24.03.2014 г. № 478-р. [Электронный ресурс]: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/13183>. Отменены распоряжением Федерального дорожного агентства от 05.05.2022 г. № 1414-р. [Электронный ресурс]: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/522301>. Доступ 05.05.2024.

⁴ ГОСТ Р 59625-2022. «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200182851>. Доступ 05.05.2024.

Представленная на рис. 2 классификация охватывает практически все известные формы движения упругих тел в ветровом потоке [10].

Воздействия, которым подвергаются мостовые сооружения, можно также разделить на техногенные и природные, в зависимости от природы их возникновения, но учитывая нелинейный характер большинства из них, результаты их совместного действия нельзя получить обычным агрегированием одиночных явлений. Поскольку вклад отдельных типов воздействий в итоговый результат может быть существенным, исследователи вынуждены усложнять применяемые подходы и модели, совмещая, например, эффект нахождения на пролетном строении транспортных средств и снеговые (и/или гололедные) отложения, местоположения которых также может изменяться в зависимости от направления и интенсивности ветра.

Так, при физическом моделировании снеговой нагрузки на макете искусственного сооружения использовался специальный пластиковый порошок, фракции которого соответствуют параметрам масштабирования сооружения, с учетом влажности в помещении лаборатории, чтобы не допустить эффектов слипания и дополнительного впитывания влаги.



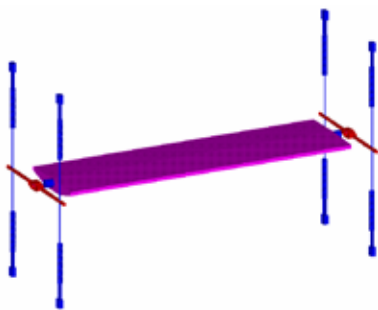


Рис. 3. Схема подвешивания на пружинных растяжках секции пролетного строения [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

Предлагаемый подход к моделированию не позволяет учесть эффектов таяния или, наоборот, намерзания дополнительной гололедной облойки на элементы конструкции, то есть он фактически сводится к дополнительной квазистатической нагрузке, локальная интенсивность которой может меняться из-за переноса частиц вследствие ветра. При этом распределение частиц, имитирующих снег, позволяет прогнозировать появление на сооружении и по близости от него опасных для работников зон, связанных с увеличенными скоростями ветровых потоков и действующими ограничениями в рамках обеспечения безопасности труда.

Физическая модель-макет секции пролетного строения лежит в основе экспериментальных исследований для мостового перехода в аэродинамической трубе (рис. 3). Макет подвешивается на пружинных крепежах и после подвергается ветровому воздействию для детектирования изгибных и крутильных колебаний с агрегированием различных форм колебаний с последующим их разделением [10].

Физическая модель-макет устанавливается в центре поперечного сечения аэродинамической трубы на специальный стенд, опоры которого жестко крепятся к полу камеры, и к ним, в свою очередь, подвешивается пролетное строение на пружинах (рис. 4). Такая компоновка эксперимента позволяет проводить как статические, так и динамические испытания мостового перехода [10; 16].

В ходе динамических испытаний пролетного строения моста определяются параметры вынужденных колебаний модели при воздействии аэродинамической нагрузки:

- амплитуды колебательных движений;
- частотные спектры колебаний;



Рис. 4. Установка для испытания макета мостового перехода в аэродинамической трубе [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

- порядковые формы колебаний;
- спектральные характеристики колебаний.

Статические испытания секции мостового перехода необходимы для выверки характеристик нагрузки и сопоставления ее с параметрами нагрузки, действующей на реальное сооружение транспортной инфраструктуры:

- лобового сопротивления характерного продольного или поперечного сечения;
- подъемной силы, действующей как на секцию пролетного строения, так и на весь стенд в целом;
- крутильного момента вокруг продольной оси макета секции пролетного строения мостового перехода.

В качестве экспериментальной установки для проведения аэродинамических экспериментальных исследований используется уникальная научная установка «Большая исследовательская градиентная аэродинамическая труба» (номер регистрации 585332, портал «Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. Центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки»; Дата регистрации: 04.05.2018).

Проектирование модели

Принимая во внимание поперечное сечение рабочей зоны аэродинамической трубы (4 x 2,5 м), из условия «прозрачности» и незагроможденности воздушного потока оптимальным представляется масштаб макета 1:40 (рис. 5). Для одновременного обеспечения геометрического подобия, нужного соотношения массы и жесткости пролетного строения предлагается использовать плоские листы алюминия, из которых на болтовых и закле-

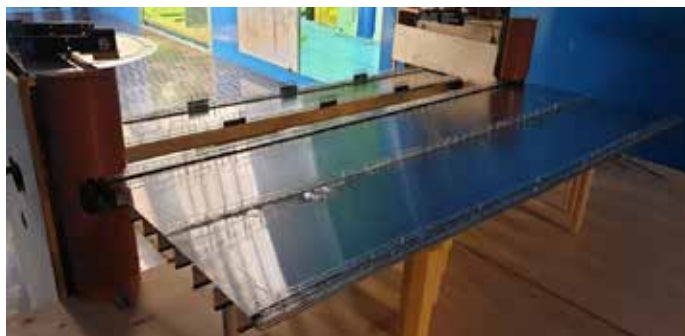


Рис. 5. Модель № 1 пролетного строения моста [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

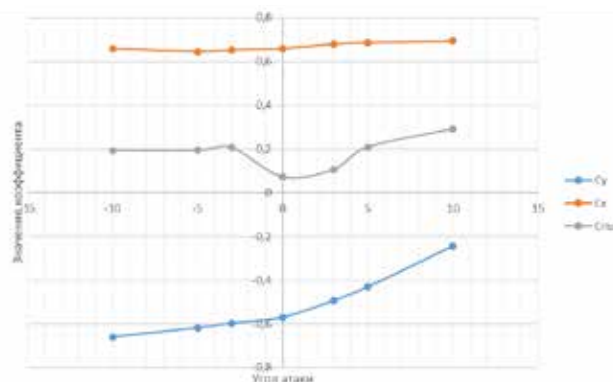


Рис. 6. Графики зависимости значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x) от угла атаки потока [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

почных соединениях собирается секция пролетного строения моста.

Предлагаемые конструктивные решения для создания макета обеспечивают не только верное геометрическое подобие, но и достоверное распределение погонных масс, при котором центры масс макета и реального сооружения совпадают в относительных координатах.

Таким образом, проектируемая модель соответствует натурному объекту по следующим параметрам:

- геометрическое подобие;
- соответствие распределения масс;
- соответствие геометрических центров масс и моментов инерции.

Это полностью удовлетворяет требованиям экспериментальных исследований.

Правильный выбор конструктивных элементов позволяет обеспечить подобие по массам и силам инерции, поставить в соответствие поведение макета пролетного строения и реального объекта транспортной инфраструктуры при аэродинамических воздействиях различной интенсивности и направлений [16].

Все частотные характеристики пролетного строения моделируются специализированными пружинами измерительного стенда.

Экспериментальные исследования проводятся в два этапа:

- статические испытания, в ходе которых определяются значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x) и аэродинамического момента (C_{mx});
- динамические испытания, направленные на вычисление амплитуд изгибных и крутильных колебаний при различных значениях скоростей и направлениях ветрового потока (α).

Статические испытания

В результате статических испытаний получены графики зависимости значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x) от угла атаки потока (рис. 6).

По полученным значениям аэродинамических коэффициентов (рис. 6) для модели № 1 возможно выполнение проверки необходимого условия возникновения аэроупругой неустойчивости галопирования – критерий Глауэрта–Ден-Гартога [10]:



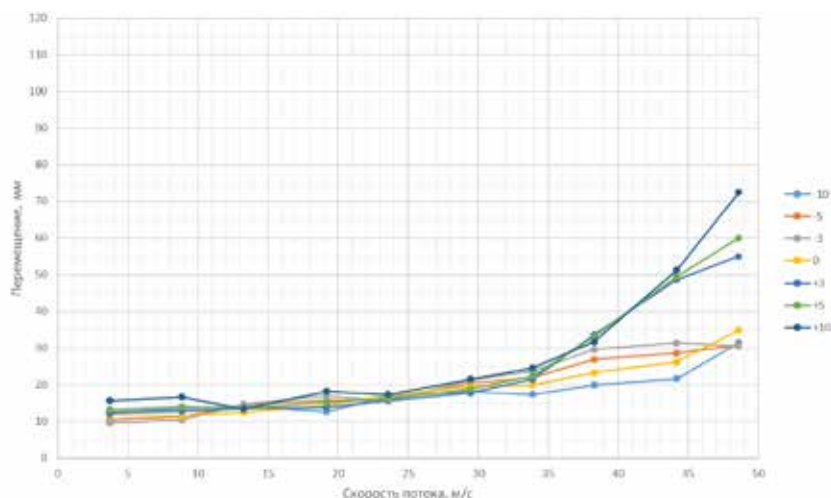


Рис. 7. Зависимость перемещений при колебательных движениях макета пролетного строения от скорости ветрового потока при его различных направлениях [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].



Рис. 8. Схема проведения эксперимента по оценке количества и расположения экипажей на пролетном строении на его аэродинамическую устойчивость [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

$$[C_L(\alpha) + C_{D'}(\alpha)] < 0. \quad (1)$$

Как видно из рис. 6, коэффициент подъемных сил на интервале возрастает, а коэффициент лобового сопротивления положителен, соответственно критерий Глауэрта–Ден-Гартога не выполняется, и галопирование невозможно.

Динамические испытания

Исследования на динамические воздействия секции пролетного строения проводятся на описанном выше стенде (рис. 3, 4), при этом параметры жесткости пружинных подвесов увязываются со скоростями ветрового потока и закладываются в модель при ее проектировании. Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 7.

Выполнена оценка влияния автомобильного трафика на аэродинамическую устойчивость (рис. 8, 9).

Испытания проводились для наветренного и подветренного пролетного строения исследуемого моста в следующих конфигурациях:

- А. Свободное пролетное строение (рис. 5);
- Б. Пролетное строение с учетом автомобильного трафика (рис. 8);
- В. Пролетное строение с учетом автомобильного трафика и снеговых отложений.

Результаты испытаний

Результаты натурных экспериментов, проведенные для двух направлений ветрового потока с углом атаки, изменяющимся в диа-

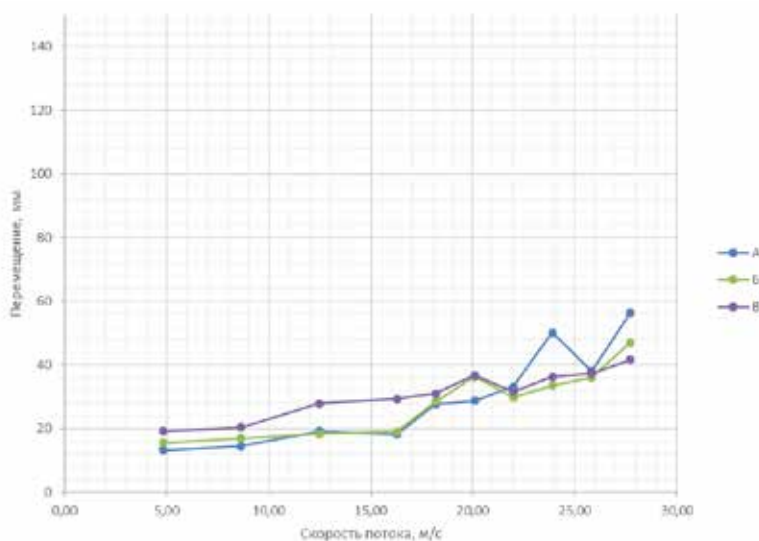


Рис. 9. Зависимость амплитуды колебаний макета пролетного строения от скорости ветрового потока для различных условий загрузки конструкции [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].



Рис. 10. Схема поперечного сечения моста [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

пазоне от -10° до $+10^{\circ}$, показали, что явления аэродинамической неустойчивости, согласно классификации (рис. 2), не возникают.

Также результаты эксперимента показали, что наличие экипажей и снеговых мешков существенно не влияет на аэродинамическую устойчивость конструкций пролетного строения в рассмотренной квазистатической постановке автомобильного трафика. Определяющим фактором является влияние расположенного в непосредственной близости существующего мостового перехода. Влияние автомобильного трафика в данном случае пренебрежимо мало.

Объект исследования № 2

Постановка задачи

Исследуется пролетное строение протяженностью 600 метров (рис. 10).

Проектирование модели

Модель масштабом 1:70 изготовлена из листового алюминия (рис. 11).

Результаты статических испытаний для модели пролетного строения моста с учетом автомобильного трафика (рис. 12) приведены на рис. 13.

Выполнена проверка критерия Глауэрта–Ден-Гартога по формуле (1): для некоторых углов атаки необходимое условие галопирования выполняется (рис. 14).

Для наглядности представления результатов, полученных в ходе экспериментальных динамических испытаний, показана графическая зависимость перемещений пролетного строения от средней скорости ветрового потока в масштабе, соответствующем реальной ситуации на объекте транспортной инфраструктуры. Фактически, при этом можно наблюдать изменение функции устойчивости конструкции моста.

Испытания проводились для наветренного и подветренного пролетного строения исследуемого моста в следующих конфигурациях:

А. Свободное пролетное строение (рис. 11);





Рис. 11. Модель пролетного строения [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].



Рис. 12. Модель пролетного строения моста (автомобильный трафик) [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

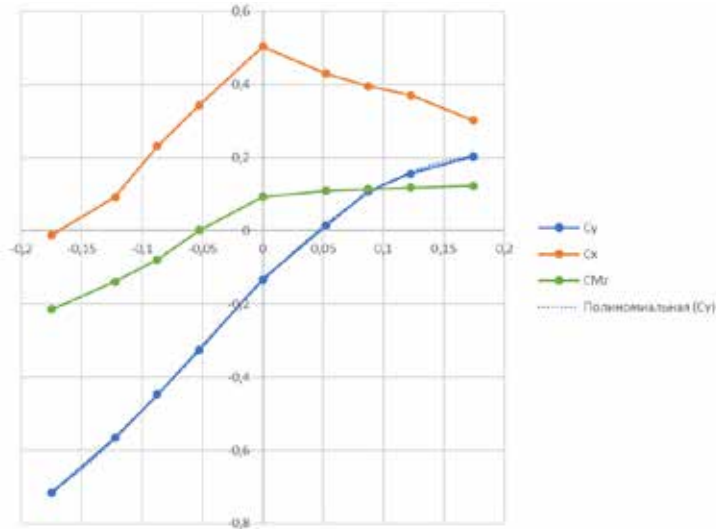


Рис. 13. Графики зависимости значения подъемной силы (C_y), силы лобового сопротивления (C_x), крутящего момента (C_{Mz}) от угла атаки потока при углах атаки $(-10^\circ - +10^\circ)$ [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

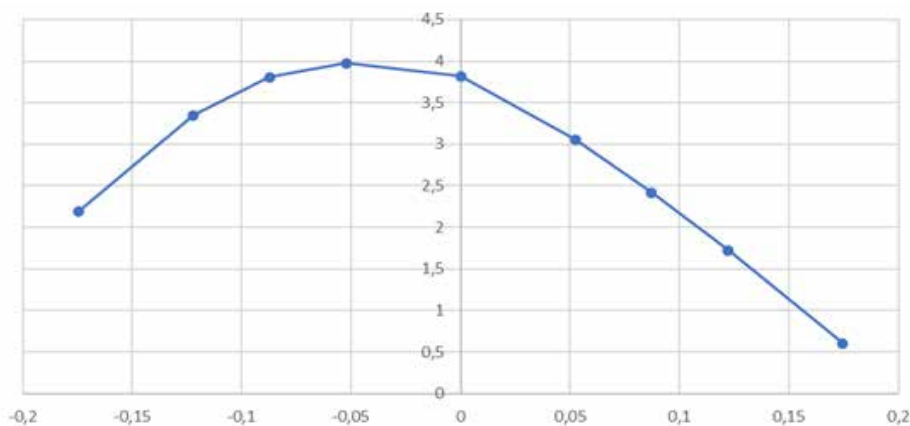


Рис. 14. График зависимости значения критерия Глауэрта – Ден-Гартога от угла атаки потока при углах атаки ($-10^{\circ} - +10^{\circ}$) [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

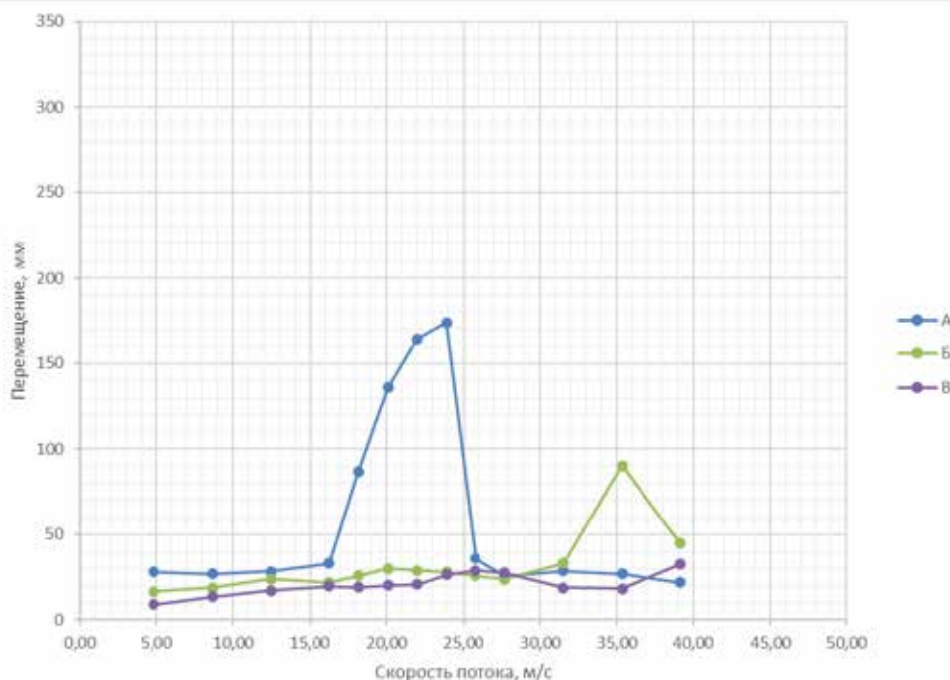


Рис. 15. Зависимость максимальных перемещений точек пролетного строения моста при колебательных движениях от скорости ветрового потока при его направлении $\alpha = 00$ [выполнено О. И. Поддаевой, П. С. Чуриным, А. Н. Федосовой].

Б. Пролетное строение с учетом снеговых отложений и автомобильного трафика;

В. Пролетное строение с учетом автомобильного трафика (рис. 12).

Моделировалась ситуация скопления автомобилей по двум направлениям движения поочередно (автомобильная пробка). В соответствии со среднестатистическими размерами автотранспорта при моделировании за основу взяты следующие габариты:

- грузовой автотранспорт – $4 \times 18 \times 2,5$ м;
- легковой автотранспорт – $1,5 \times 4,2 \times 1,7$ м.

На рис. 15 изображены графические зависимости максимальных перемещений пролетного строения от скорости ветрового потока для различных случаев нагружения секции пролетного строения при угле атаки $+3^{\circ}$.

ВЫВОДЫ

Проведенные с физическим макетом сооружения натурные испытания на предмет возможной потери аэродинамической устойчивости секций пролетных строений мостового перехода с учетом автомобильного трафика показали, что наличие авто-



мобильного трафика, при исследованиях на отдельных углах атаки, оказывает благоприятное влияние на аэродинамическую устойчивость пролетного строения, что согласуется с выводами работы [8]: для системы с двумя степенями свободы неподвижные транспортные средства довольно благотворно влияют на устойчивость моста. Это в первую очередь объясняется дополнительной турбулизацией ветрового потока над пролетным строением, что с учетом различных габаритов автомобильного трафика на его отдельных участках препятствует формированию стабильной дорожки Кармана и возникновению резонансного вихревого возбуждения.

Представляется, что полученные результаты дают возможность создания более точных моделей аэродинамических нагрузок на мостовые сооружения с учетом влияния трафика экипажей и дополнительной снеговой нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jain, A., Jones, N. P., Scanlan, R. H. Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-Span Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1996, Vol. 122, Iss. 7, pp. 716–725. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:7\(716\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:7(716)).
2. Poddaeva, O., Churin, P. Experimental study of aerodynamic stability of a long-span bridge under wind loads. *Energy Reports*, 2023, Vol. 9, Suppl. 9, pp. 370–375. DOI: [10.1016/j.egyr.2023.05.273](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.273).
3. Гостев Ю. А., Обуховский А. Д., Саленко С. Д. Численное моделирование поперечного обтекания пролетных строений балочных мостов // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. – 2018. – № 4. – С. 362–378. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378>.
4. Simiu, E., Scanlan, R. H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. 3rd ed. Wiley-Interscience, 1996, 704 p. ISBN 978-0471121572.
5. Соловьев С. Ю. Аэродинамическая устойчивость большепролетных мостов // *Транспорт Российской Федерации*. – 2016. – № 5 (66). – С. 47–50. EDN: WZJSVT.

6. Chen, S., Nelson, R., Chen, F., Chowdhury, A. Impact of Stochastic Traffic on Modified Cross-Section Profiles of a Slender Long-Span Bridge: Wind Tunnel Experimental Investigation. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, Vol. 139, Iss. 3, pp. 347–358. [Доступ для подписчиков]. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000444).

7. Wu, J., Zhou, Yu., Chen, S. Wind-induced performance of long-span bridge with modified cross-section profiles by stochastic traffic. *Engineering Structures*, 2012, Vol. 41, pp. 464–476, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.004>.

8. Pospisil, S., Buljac, A., Kozmar, H., Kuznetsov, S., Macháček, M., Král, R. Influence of Stationary Vehicles on Bridge Aerodynamic and Aeroelastic Coefficients. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, Vol. 22, Iss. 4, 05016012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001017](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001017).

9. Локтев А. А., Королев В. В., Шишкина И. В., Поддаева О. И., Грибач Ю. С. Исследование мостового перехода высокоскоростной железнодорожной магистрали при аэродинамических воздействиях // *Транспорт Урала*. – 2022. – № 3 (74). – С. 55–59. DOI: [10.20291/1815-9400-2022-3-55-59](https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-3-55-59).

10. Казакевич М. И. Ветровая безопасность конструкций. Теория и практика. – М.: Ин-т Гипростроймост, 2015. – 288 с.

11. Казакевич М. И. Классификация аэродинамических экспериментальных исследований // *Вестник Донбасской Национальной Академии Строительства и Архитектуры*. – 2011. – № 4. – С. 154–157. EDN: WYGTEK.

12. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт. – 1987.

13. Казакевич М. И. Аэродинамика инженерных сооружений. – М.: Ин-т Гипростроймост, 2014. – 167 с.

14. Solari, G., Bartoli, G., Gusella, V., Piccardo, G., Pistoletti, P., Ricciardelli, F., Vintani, A. The new CNR-DT 207/2008 Guidelines on Actions and Effects of Wind on Structures. In: 5th European & African conference on wind engineering (EACWE): Florence Italy, July 19th–23rd 2009. Conference proceedings 2009. Eds. Borri, C., Augusti, G., Bartoli, G., Facchini, L. Firenze University Press, 517 pp. [Электронный ресурс]: <https://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/164.pdf>. Доступ 05.05.2024.

15. Саленко С. Д. Нестационарная аэродинамика плохообтекаемых многобалочных конструкций / Дисс... докт. техн. наук. – Новосибирск, Ин-т теорет. и прикладной механики СО РАН, 2005. – 332 с.

16. Поддаева О. И. Основы обеспечения техносферной безопасности критически важных объектов транспортной инфраструктуры в пределах жизненного цикла / Автореф. дис... докт. техн. наук. – М.: РУТ, 2023. – 48 с. С. 41–48.

Информация об авторах:

Поддаева Ольга Игоревна – доктор технических наук, доцент, заведующий учебно-научно-производственной лабораторией по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, poddaevaol@gmail.com.

Локтев Алексей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортного строительства Российского университета транспорта, Москва, Россия, aaloktev@yandex.ru.

Чурин Павел Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель заведующего учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, rashok_inbox.ru.

Федосова Анастасия Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия, mgso-misi@list.ru.

Статья поступила в редакцию 05.05.2024, одобрена после рецензирования 22.07.2024, принята к публикации 26.07.2024.