

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ЗОН ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫЕ МОСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ



О.И. Поддаева

В статье рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением безопасности труда работников при выполнении работ на большепролетных мостовых конструкциях с учетом ветрового воздействия. Представлены основные подходы к решению задачи динамического взаимодействия мостовых сооружений и ветрового потока, включая экспериментальные исследования и численное моделирование, с последующим выявлением опасных зон нахождения работников на сооружении. По результатам исследования выявлена необходимость определения параметров опасных зон для работников и доработки норм охраны труда.

Ключевые слова: мостовое сооружение, колебания, аэродинамическая труба, экспериментальное моделирование, численные методы, CFD

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_100

Использование в строительстве современных конструкционных материалов позволило инженерам существенно увеличить вертикальные и горизонтальные размеры зданий и сооружений, появились высотные и большепролетные конструкции. Появление таких конструкций в свою очередь привело к необходимости ужесточения требований к проектированию, обеспечивающих надежность и безопасность зданий и сооружений, а также к изменению норм охраны труда при производстве ремонтных, диагностических и иных работ на таких объектах. Появление новых и актуализация имеющихся нормативно-правовых документов в области охраны труда происходит в области проведения работ на высоте, над водой, при воздействии ветровых потоков и т.д. Но вместе с конкретными количественными значениями, определяющими, например, скорость ветрового потока, в нормативных документах есть и качественные характеристики: «напор ветра», «сильный ветер» (Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 16.11. 2020 №782н «Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте»). Оценка

возможности определения количественных параметров состояния и поведения большепролетных мостовых переходов, рабочей среды в непосредственной близости от них и опасных зон вблизи различных элементов рассматриваемых конструкций и является одной из задач настоящего исследования наряду с изучением аэродинамического поведения мостовой конструкции при действии ветровых потоков.

Одной из основных особенностей высотных и большепролетных строительных конструкций является их восприимчивость к динамическим нагрузкам, в том числе к ветровым. Значительное число катастроф с такими сооружениями произошло именно вследствие природных кинематических воздействий. Стоит вспомнить наиболее известные аварии — разрушение Такомакого моста (США), колебания Волгоградского моста, моста на остров Русский (РФ) и многие другие. Данные эффекты напрямую связаны с явлениями аэродинамической неустойчивости. Классификация этих явлений широко представлена как в нормативной документации [1;2], так и в научно-технической литературе [3;4]. Несмотря на то, что фиксация подобных

Поддаева Ольга Игоревна, кандидат технических наук, доцент, заведующий Учебно-научно-производственной лабораторией по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). Область научных интересов: строительная аэродинамика, механика деформируемого твердого тела. Автор более 110 научных работ.

явлений не всегда приводит к разрушению конструкции их исследованию стоит уделять внимание, как с точки зрения обеспечения расчетной долговечности, так и с точки зрения обеспечения требований охраны труда в части воздействия на работников, участвующих в технологических процессах непосредственно на мостовом переходе, негативные воздействия могут быть связаны как с повышенной вибрацией и шумом, так и с ветровыми потоками, имеющими скорость более 15 м/с.

Основным методом оценки аэродинамической устойчивости большепролетных мостовых конструкций и распределения ветровых потоков вокруг них является экспериментальное моделирование в аэродинамических трубах [5–7]. При этом, в зависимости от решаемой задачи, исследования проводятся на разных типах моделей (отсечных, масштабных динамически подобных) с использованием различных испытательных стендов и измерительного оборудования. Бурное развитие в последние годы получили исследования с использованием численных методов (CFD) [5; 8–10] и, хотя данные методы по-прежнему имеют ряд существенных ограничений, на основании таких исследований можно получить предварительную оценку устойчивости конструкции в ветровом потоке [11; 12], распределения частот собственных и вынужденных колебаний отдельных элементов конструкции, распределения ветровых потоков на мостовом переходе, что в будущем позволит сформировать картину расположения опасных зон при проведении различных работ [13; 14].

В данной статье приведены основные достоинства и недостатки различных методов и подходов к оценке аэродинамической устойчивости мостовых конструкций и формирования ветровых потоков вокруг них [11; 12], а также примеры исследований, выполненных на базе Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям НИУ МГСУ.

Экспериментальное моделирование

Наиболее распространенным методом экспериментальных исследований являются исследования на отсечных моделях. Алгоритм исследований достаточно подробно описан в научно-технической литературе [2; 6; 7]. При проведении данных исследований изготавливается максимально жесткая геометрически подобная модель центральной части (секции) пролета мостового сооружения [15; 16]. Помимо геометрического подобия непосредственно при изготовлении модели соблюдается подобие по распределению масс, и, соответственно, моментов инерции.

Сами исследования проводятся в специализированных стендах, позволяющих позиционировать модель в потоке, а также разместить требуемое измерительное оборудование (рис. 1).

Исследования проводятся в два этапа — статические испытания и динамические испытания.

При проведении статических испытаний модель жестко крепится к шестикомпонентным сило-моментным датчикам и измеряются нагрузки и крутящие моменты. На основании результатов таких испытаний



Рис. 1. Испытания отсечной модели пролетного строения в специализированном стенде на базе УНУ БИГАТ НИУ МГСУ

рассчитываются значения безразмерных аэродинамических коэффициентов — аэродинамического сопротивления, подъемной силы и крутящего момента, далее на основании полученных значений оценивается возможность возникновения эффекта галопирования по критерию Глауэрта — Ден-Гартога, а также возможность возникновения дивергенции. Важность данных исследований трудно недооценить, ведь по общепринятым стандартам явления галопирования и дивергенции являются недопустимыми для любых строительных конструкций и могут привести к их полному разрушению и созданию угрозы здоровью и жизни работников, находящихся на данной конструкции или вблизи от нее [17;18].

При проведении статических испытаний модель размещается на пружинных подвесах, с помощью которых моделируются две формы колебаний — первая изгибная и первая крутильная (рис. 2).

Критериями подобия при проведении таких испытаний являются число Струхала (подобие по собственным частотам колебаний), число Ньютона (подобие по распределению масс), число Скрутона (подобие по логарифмическому декременту затухания). При проведении данных испытаний измеряются амплитуды колебаний пролетного строения при различных скоростях и углах атаки ветрового потока. Данные испытания позволяют зафиксировать возможность возникновения наиболее распространенного на практике явления аэродинамической неустойчивости — вихревого возбуждения, а также оценить полученные значения амплитуд колебаний и виброускорений. Данные зна-

чения сравниваются с критическими, определенными на этапе проектирования или предельно допустимыми в соответствии с действующими нормативными документами, что позволяет обеспечить прочность и долговечность конструкции, комфортность и безопасность пребывания на ней работников, а также предложить научно обоснованные способы и системы защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов во время проведения мониторинга, ремонтных работ и работ по текущему содержанию конструкции (рис. 3).

В отдельных случаях оценка аэродинамической устойчивости мостовых сооружений и распределение ветровых потоков вокруг них выполняется на полных динамически подобных моделях [5]. При этом проектируется и изготавливается модель не только участка пролетного строения, а модель всего сооружения с опорами и пилонами (при их наличии). Такие испытания незаменимы для оценки устойчивости большепролетных мостов на стадии строительства методом надвижки, а также актуальны для вантовых и подвесных мостовых сооружений [14;19].

Исследования на полных динамически подобных моделях в теории позволяют получить наиболее полную информацию о нелинейном динамическом взаимодействии мостового сооружения с ветровым потоком. При проведении испытаний учитывается рельеф и окружающая застройка, рассматриваются различные направления ветрового потока. В тоже время данный вид моделирования имеет ряд существенных недостатков, в первую очередь это высокие слож-



Рис. 2. Монтаж отсечной модели пролетного строения в специализированном стенде на пружинных подвесах на базе УНУ БИГАТ НИУ МГСУ

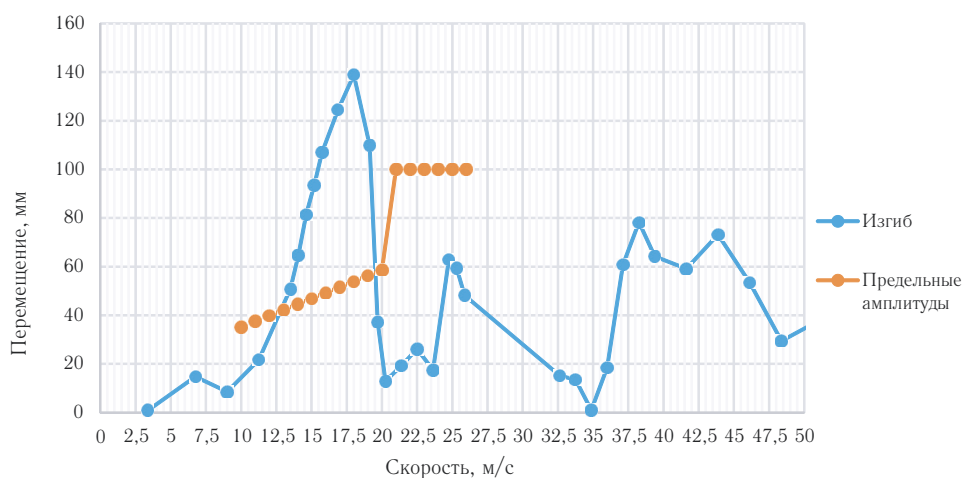


Рис. 3. Сопоставление амплитуд колебаний, полученных в результате экспериментальных исследований с предельно допустимыми значениями

ность, стоимость и сроки проектирования и создания модели, необходимость соблюдения большого количества критериев подобия, что с учетом параметров реальных сооружений (размеры, динамические характеристики и др.) чрезвычайно затруднительно и, зачастую, невозможно [3;4].

Развитие данного направления экспериментального моделирования является наиболее приоритетной и наукоемкой задачей как современной архитектурно-строительной аэродинамики, так и техносферной безопасности, связанной со строительством и эксплуатацией таких сооружений. Эта задача имеет как фундаментальную ценность с точки зрения развития аэродинамики — моделирование нелинейных динамических процессов взаимодействия зданий и сооружений с ветровым потоком, так и прикладную с точки зрения разработки методик проектирования и испытания полных динамически подобных моделей большепролетных мостовых сооружений и прогнозирования параметров состояния опасных зон на мостовых переходах для работников, отвечающих за эксплуатацию моста, водителей, пассажиров и пешеходов.

Численное (математическое) моделирование

Развитие аппаратного и программного обеспечения современной вычислительной техники открывает широкие возможности для решения задач аэродинамики зданий и сооружений методами численного моделирования (CFD). Классические задачи данного направления, такие как определение ветровой нагрузки на здания и сооружения в статической поста-

новке, оценка пешеходной комфортности городской застройки и др., в настоящее время практически не уступают по достоверности аналогичным результатам экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, при этом обладая рядом преимуществ — сравнительно низкие стоимость и сроки выполнения работ, большая вариативность и изменяемость численных моделей. Основным недостатком при этом являются высокие требования к квалификации специалиста, занимающегося расчетами, существенная зависимость результатов моделирования от параметров расчетной сетки, граничных условий и др., что говорит о необходимости использования верифицированных программных комплексов и/или проведения валидации с результатами экспериментальных исследований по отдельным объектам.

Решение нелинейных задач динамического взаимодействия сооружений с ветровым потоком, воздействия ветрового потока на работников, находящихся в непосредственной близости от элементов конструкции, существенно повышает роль перечисленных выше недостатков, и тем самым усложняет решение данных задач методами численного моделирования. Тем не менее отказываться от данного инструмента нецелесообразно.

Применение классических подходов математического моделирования основанных на системе уравнений RANS, на предварительном этапе исследований позволяет оценить характер обтекания пролетного строения мостового сооружения, зафиксировать периодический срыв турбулентных вихрей с конструкции (образование дорожек Кармана). На дан-

ном этапе можно сделать предварительные выводы об форме пролетного строения с точки зрения аэродинамики и рассмотреть варианты ее оптимизации (рис. 4) [10;11].

Более сложные вихреразрешающие подходы (метод DES в сочетании с моделированием динамики моста по симплектическому методу Эйлера) позволяют получать физически адекватные картины течения (рис. 5), по которым можно составить карту расположения и состояния опасных зон на мостовом переходе в зависимости от направления и скорости воздействующего ветрового потока. Несмотря на то, что в настоящее время данные подходы являются очень ресурсо- и трудоемкими, полученные на их

основе результаты хорошо коррелируются с экспериментальными данными, а развитие вычислительной техники вскоре позволит перейти к их повсеместному использованию [8;12].

Заключение

Проблема оценки аэродинамической устойчивости является одной из наиболее актуальных в архитектурно-строительной аэродинамике, а проблемы прогнозирования параметров состояния опасных зон, научного обоснования систем, средств и способов защиты работника от воздействия вредных и опасных факторов при выполнении технологических процессов на мостовом переходе, актуальны и своев-

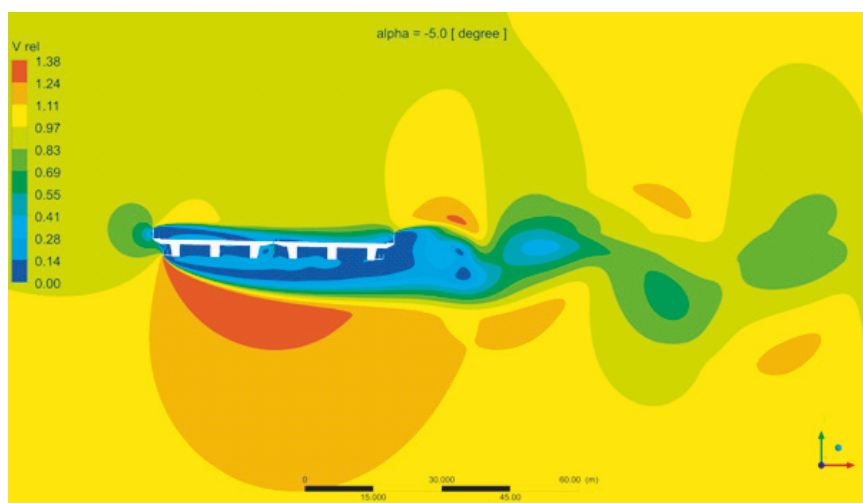


Рис. 4. Предварительное численное моделирование

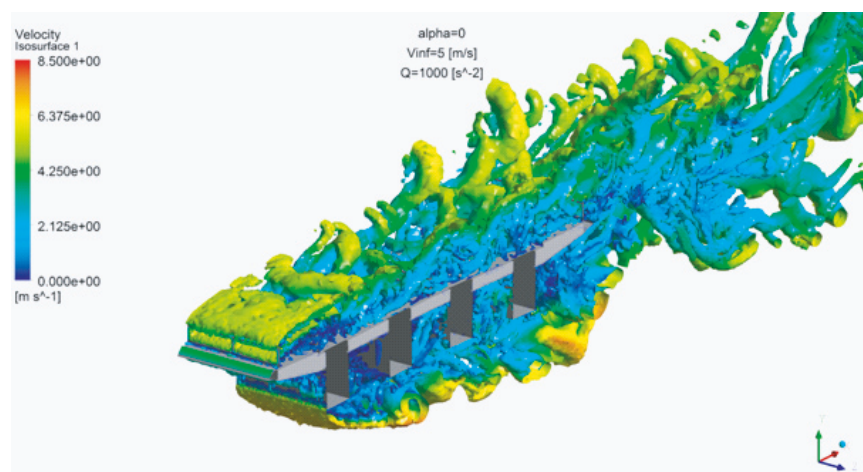


Рис. 5. Визуализация вихревой системы моста

ременны для охраны труда и техносферной безопасности в целом. Несмотря на то, что решением данной проблемы ученые со всего мира занимаются начиная с середины прошлого столетия, однозначного решения они не имеют.

Действующие в области надежности и безопасности строительных конструкций, а также в области охраны труда нормативные документы регламентируют проведение испытаний в аэродинамических трубах, как правило такие испытания проводятся на отсечных моделях в статической и динамической постановке. В отдельных случаях требуется проведение существенно более сложных испытаний на полных динамически подобных моделях, при этом методики как изготовления таких моделей, так и проведения самих испытаний фактически отсутствуют.

Численное (математическое) моделирование используется как вспомогательный инструмент. В рамках предварительного численного моделирования осуществляется оптимизация формы пролетного строения, выполняются предварительные расчеты основных аэродинамических характеристик. При этом использование современных вихреразрешающих подходов к численному моделированию (DES), позволяет получать адекватные результаты, хорошо коррелирующие с результатами эксперимента и

определять координаты расположения и параметры состояния опасных зон для работников, находящихся на мостовых переходах различных конструктивных схем.

На практике наиболее оптимальным в настоящее время является использование комплексного расчетно-экспериментального подхода, позволяющего использовать все плюсы и минусы экспериментальных и численных методов, включающего предварительное численное моделирование методом RANS, статические и динамические испытания на отсечных моделях в аэродинамических трубах. В рамках же передовых научных исследований необходимо развивать современные подходы к численным методам решения нелинейных задач динамического взаимодействия строительных конструкций с ветровым потоком, а также совершенствовать методы изготовления полных динамически подобных моделей. 

Благодарность

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

Литература

1. BD 49/01 (2001). Design rules for aerodynamic effects on bridges. BD 49/01, vol. 1, Sect. 3, Part 3. The Highways Agency.
2. CNR-DT, 207/2008. (2010). Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. 2008 National Research Council.
3. Kazakevich, M.I. (2014). Aerodynamics of engineering structures. Moscow: Institute Giprostroymost, ISBN 978-5-93307-014-6.
4. Kazakevich, M.I. (2010). Fundamentals of calculations of structures for wind effects. Moscow: Publishing house MISI-MGSU, ISBN 978-5-7264-1932-9.
5. Diana, G., Fiammenghi, G., Belloli, M., & Rocchi, D. (2013). Wind tunnel tests and numerical approach for long span bridges: The Messina bridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 122, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.012>
6. Poddaeva, O., Fedosova, A., & Gribach, J. (2019). The study of wind effects on the bridge constructions. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 97, p. 03030). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199703030>
7. Churin, P., & Fedosova, A. (2019, November). Aerodynamic Stability of Bridge Structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 661, No. 1, p. 012050). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/661/1/012050>
8. Bai, Y., Sun, D., & Lin, J. (2010). Three dimensional numerical simulations of long-span bridge aerodynamics, using block-iterative coupling and DES. *Computers & Fluids*, 39(9), 1549-1561. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.05.005>
9. Abbas, T., Kavrakov, I., & Morgenthal, G. (2017, December). Methods for flutter stability analysis of long-span bridges: a review. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering* (Vol. 170, No. 4, pp. 271–310). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jbren.15.00039>

10. Jeong, W., Liu, S., Bogunovic Jakobsen, J., & Ong, M. C. (2019). Unsteady RANS simulations of flow around a twin-box bridge girder cross section. *Energies*, 12(14), 2670. <https://doi.org/10.3390/en12142670>
11. De Miranda, S., Patruno, L., Ricci, M., & Ubertini, F. (2015). Numerical study of a twin box bridge deck with increasing gap ratio by using RANS and LES approaches. *Engineering Structures*, 99, 546-558. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.017>
12. Ageev, N., Poddaeva, O., Fedosova, A., & Egorychev, O. (2020, June). Numerical and experimental assessment of frequencies and amplitudes when swirling excitation of bending vibrations of construction structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 869, No. 5, p. 052002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/5/052002>
13. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 16.11. 2020 № 782н «Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте». — URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/1822> (дата обращения 26.09.2021). — Текст: электронный.
14. Локтев, А.А. Математическое моделирование аэродинамического поведения антенномачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном транспорте / А.А. Локтев, В.В. Королёв, О.И. Поддаева, К.Д. Степанов, И.Ю. Черников. — Текст: непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2018. — Т.77, № 2. — С. 77–83.
15. Локтев, А.А. Моделирование мостотоннеля для пропуска легкового транспорта через объекты инфраструктуры / А.А. Локтев, В.П. Сычёв, О.И. Поддаева, А.В. Потапов, Г.Н. Талашкин. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2017. — № 1. — С. 73–78.
16. Локтев, А.А. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях / А.А. Локтев, В.В. Королёв, Д.А. Локтев, Д.Р. Шукюров, П.А. Гелюх, И.В. Шишкина. — Текст: непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2018. — Т. 77, № 6. — С. 331–336.
17. Локтев, А.А. Высокочастотные вибрации в элементах подвижного состава на мостовых сооружениях / А.А. Локтев, П.А. Гелюх, В.В. Королёв. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — № 5. — С. 13–15.
18. Королёв, В.В. Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки / В.В. Королёв, А.А. Локтев, И.В. Шишкина, Е.А. Гридасова. — Текст: непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2020. — Т.79, № 3. — С. 127–138.
19. Кочнев, В.А. Моделирование ветровой нагрузки на мостотоннель для пропуска пассажирского транспорта в сложных природных условиях / В.А. Кочнев, Т.А. Ковалева, А.А. Локтев, В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // В сборнике: Строительство в прибрежных курортных регионах. Материалы X Международной научно-практической конференции; Под научной редакцией К.Н. Макарова, 2018. — С. 81–85.