

УДК 621.039

ББК 02.8.6

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЖД С УЧЕТОМ ИНТЕНСИВНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОТ СКОРОСТНЫХ СОСТАВОВ

Каплунов С. М.¹, Вальес Н. Г.², Фурсов В. Ю.³,

*(ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва),*

Белостоцкий А. М.⁴

(НИЦ СтаДиО, Москва),

Дубинский С. И.⁵

(МГСУ, Москва)

Реализуется комплексная методика на основе комбинированного подхода для моделирования аэродинамических нагрузок на элементы инфраструктуры при прохождении скоростных составов (станционные сооружения и конструкции, пешеходные переходы, мосты и тоннели). Работа посвящена разработке и реализации (в виде комплексов программ) эффективных методов моделирования течений вязкой жидкости или газа для исследования аэрогидродинамических нагрузок на тела, совершающие произвольные движения, включая изменение формы и для решения задач движения тел под действием аэродинамических сил.

¹ Савелий Моисеевич Каплунов, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией (kaplunov@imash.ru).

² Наталья Георгиевна Вальес, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (nvalles@imash.ru).

³ Валерий Юрьевич Фурсов, младший научный сотрудник (97dis@mail.ru).

⁴ Александр Михайлович Белостоцкий, доктор технических наук, профессор, директор НИЦ СтаДиО (stadyo@stadyo.ru).

⁵ Сергей Иванович Дубинский, кандидат технических наук, доцент (sergdubpodlipki@mail.ru).

Ключевые слова: аэродинамические нагрузки, элементы инфраструктуры, срывное обтекание, вихри Кармана, создание объемных моделей скоростных составов, расчетные сетки, модели турбулентности, метод дискретных вихрей, коэффициенты подъемной силы и сопротивления.

1. Введение

ОАО «РЖД» выступило инициатором создания технологической платформы «Высокоскоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт», основной задачей которой является разработка комплекса технических регламентов и национальных стандартов с учетом мирового опыта проектирования, строительства и эксплуатации скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта, позволяющих осуществлять перевозочный процесс в соответствии с мировым уровнем.

2. Методы решения поставленных задач

Основная задача проекта – моделирование и оценка аэродинамических нагрузок на элементы инфраструктуры при прохождении скоростных составов (станционные сооружения, мосты и туннели).

В проекте предлагается использование комбинированного подхода, основанного на взаимосвязанном использовании двух методов.

Первый из них – один из наиболее мощных и современных программных комплексов гидрогазодинамических расчетов *ANSYS CFD*, реализующий метод конечных объемов для решения трехмерных уравнений Навье–Стокса с использованием широкого спектра моделей турбулентности и постановок (*LES*, *DES*, *SAS SST*, *RANS* и *URANS*) и верифицированный исполнителями на широком круге задач, для которых имеются результаты испытаний в аэродинамических трубах и натурные замеры [1, 3–8].

Непосредственно расчеты аэродинамики выполнялись с использованием программного модуля *ANSYS CFX* (далее *CFX*). Модуль *CFX* позволяет моделировать ламинарный и турбулентный потоки, сжимаемую и несжимаемую жидкости, связанные задачи теплообмена, многофазные потоки, процессы кипения, горения, конденсации, фильтрации, химические реакции и многое другое. Поддерживаются более двадцати различных моделей турбулентности. Модуль *CFX* не включает генераторов сеток, а позволяет импортировать сетки, подготовленные различными программами, в частности и в препроцессоре *ANSYS* с использованием параметризованных макросов *ANSYS APDL*.

Второй из методов – оригинальный и эффективный модернизированный метод дискретных вихрей (разработка ИМАШ РАН), позволяющий оперативно решать широкий круг задач обтекания жестких и упругих тел различной конфигурации для заданного диапазона чисел Рейнольдса при проведении численного эксперимента, апробированный известными данными физических экспериментальных исследований. В рамках этого метода производится определение аэродинамических сил, действующих на подвижные элементы и многокомпонентные системы в конструкциях инфраструктуры (мосты, переходы, трубные конструкции, упругие стационарные сооружения), а также расчет автоколебаний конструкций при прохождении скоростных составов в 2D-постановке [2, 9–12].

Применение современных программных средств и мощной компьютерной техники в рамках первого метода позволяет отечественным специалистам решать поставленные задачи с необходимыми точностью и достоверностью в 3D-постановке. Ввиду крайней трудоемкости данных расчетов, даже с применением многопроцессорной техники, представляется целесообразным параллельно использовать большой опыт аналитических расчетов и классических методов, накопленный отечественной научной школой (второй метод).

В использовании комбинации этих двух подходов и состоит основная идея и оригинальность предлагаемой методики.

3. Основные результаты

Существующие программные комплексы вычислительной гидродинамики с помощью сеточных методов оказываются неэффективными, когда проводится расчет конструкции с изменяемой геометрией. В этом случае он оказывается чрезвычайно длительным. Поэтому актуально использование вихревых методов с применением моделей среды, которые позволяют при решении задач гидроупругости получать с приемлемой для инженерных расчетов точностью нестационарные нагрузки при существенно меньших вычислительных затратах.

Модернизированный метод дискретных вихрей не требует построения сеток, не содержит эмпирических параметров, позволяет достигать высокого разрешения структуры течения. Метод обладает низкой схемной вязкостью, численная схема устойчива (не бывает остановов из-за неограниченного роста переменных). Разработанный метод также существенно расширяет возможности численного исследования механизма вихреобразования и структуры нестационарных отрывных течений при произвольном движении и изменении формы обтекаемых тел, а также решению таких задач, как оптимальный выбор параметров конфигурации поперечного сечения.

Предложенный модернизированный метод дискретных вихрей применим для расчета отрывного обтекания одиночных тел, колеблющихся как вдоль, так и поперек потока, а также в случае возникновения и развития режима автоколебаний. Метод позволяет установить ширину зоны затягивания и амплитудно-частотные характеристики режима. С помощью этой модели рассматривается также задача об отрывном обтекании многокомпонентной конструкции, решения для которой имеют принципиальные отличия по сравнению с задачей об одиночном теле (рис. 1, 2).

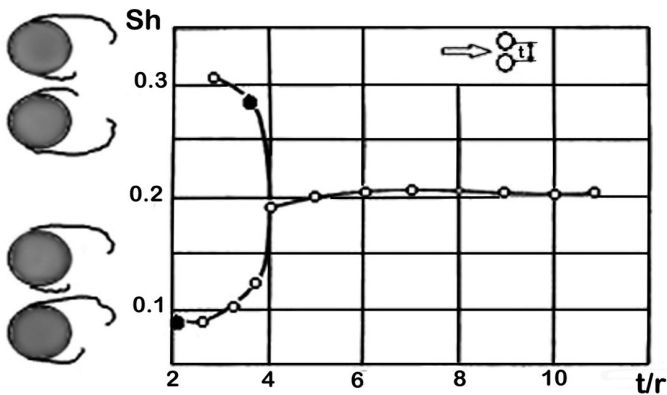


Рис. 1. Безразмерная частота срыва вихрей для двух труб в зависимости от расстояния между трубами. Черные точки – расчет, белые точки – эксперимент

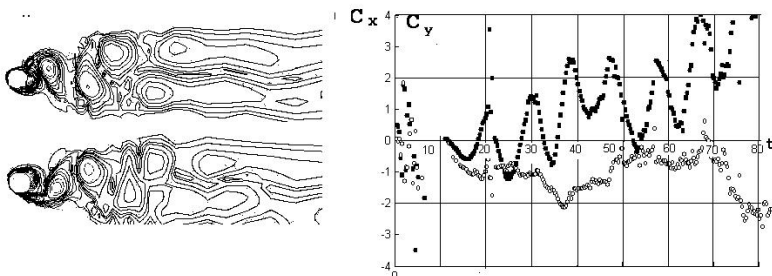


Рис. 2. Изменения во времени расчетных коэффициентов гидродинамических сил C_x , C_y , действующих на каждую из двух труб в потоке при срывном обтекании

Как показал опыт моделирования с использованием метода дискретных вихрей, полученная модель обладает следующими преимуществами. На единой математической и вычислительной основе удастся создать целую иерархию программных средств,

охватывающих широкий спектр приложений. На их базе и в сочетании с физическим экспериментом накапливается важный материал в познавательном плане – устанавливаются пределы применимости схем и моделей. Таким образом, осуществляется переход от отдельных задач к созданию комплексных задач на системной основе.

Опыт многолетних исследований по развитию и применению метода дискретных вихрей выявил его важные преимущества. Во-первых, он обладает уникальными возможностями по выстраиванию вихревых следов и струй. Во-вторых, в нем содержится явный механизм стохастизма (детерминированного хаоса), что важно для моделирования турбулентности. В третьих, здесь существенно снижается размерность задачи, поскольку нужно следить не за всем пространством, а только за вихрями на поверхности тела и в следе.

Впервые получена формула для определения аэродинамических сил, действующих на произвольный профиль, через мгновенные скорости дискретных вихрей при срывном обтекании. При этом тело может совершать автоколебания в срывном потоке (рис. 3).

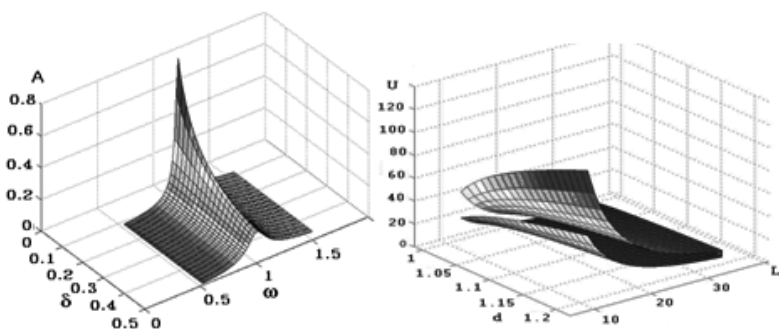


Рис. 3. Области опасных состояний. Слева: амплитуда автоколебаний газовой трубы в воде в зависимости от декремента колебаний δ и безразмерной скорости ω обтекания потоком. Справа: опасные скорости натекания потока в зависимости от диаметра d и длины пролета трубы L

В соответствии с разработанными алгоритмами созданы оригинальные программы, позволяющие проводить расчеты продолжительных реализаций нестационарных гидродинамических сил при отрывном обтекании тел и системы тел, имеющих разнообразные профили и колеблющихся как вдоль, так и поперек потока воздуха (рис. 3). С помощью этой программы проводились численные эксперименты, в которых определялись аэродинамические силы, действующие на подвижные элементы инфраструктуры (мосты, переходы, трубные конструкции, упругие стационарные сооружения) и рассчитывались автоколебания конструкций при прохождении скоростных составов в 2D-постановке. Для решения граничной задачи предложен универсальный комбинированный метод, совмещающий методы коллокаций и зеркального отражения, позволяющий рассчитать срывное обтекание тела произвольного поперечного сечения [2, 8–12].

Определены величины критической скорости обтекания воздухом в зависимости от безразмерных параметров, включающих в себя величину логарифмического декремента колебаний и собственную частоту колебаний тела. Выявлены области допустимых режимов эксплуатации для всех случаев возбуждения колебаний конструкций в широком диапазоне скоростей обтекания (рис. 3).

В работе приводится описание созданных объемных моделей скоростного состава для дальнейшего определения аэродинамических параметров, включая выбор наилучших методологий построения расчетных сеток, моделей турбулентности, параметров и опций вычислительных алгоритмов применительно к данному классу задач и выбранному базовому программному комплексу (рис. 4). Реализуются процедуры передачи аэродинамических нагрузок в программы расчетов динамики и прочности конструкций с проведением реализации и верификации «инженерного» подхода для оценки величин и зон появления пиковых давлений.

Полученные программы позволяют, в отличие от известных, проводить достаточно оперативную оценку характерных

параметров сложных амплитудно-частотных характеристик (особенно для нелинейных систем) колебаний тел, а также выявлять для исследуемых процессов и различных типов многокомпонентных систем (с различными количествами опор с зазорами и величинами пролетов между ними) важные для проектирования, эксплуатации и прогнозирования ресурса параметры.

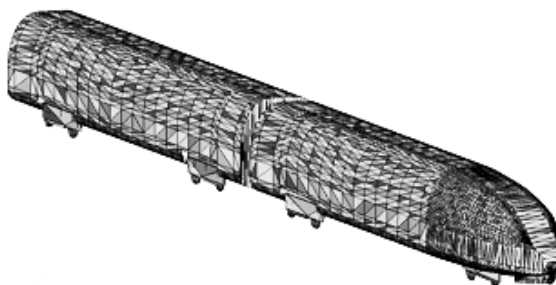


Рис. 4. Геометрическая поверхностная модель передних вагонов Сапсана

Полученные результаты позволяют выявить зоны первоочередного мониторинга и диагностики обтекаемых ветром стационарных конструкций, а также предложить перспективные пути и технологические мероприятия по повышению прочности, износостойкости и долговечности рассматриваемых ответственных конструкций.

4. Возможность использования полученных результатов в рамках утвержденной технологической платформы «Высокоскоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт»

Предлагаемый подход имеет следующие преимущества и особенности:

– комбинированный подход является оригинальным в плане взаимосвязанного использования двух прогрессивных расчетных методов для эффективного решения задач аэродинамики в 3D- и 2D-постановках и не имеет аналогов по направлениям реализации взаимной связи;

– он позволяет осуществлять динамический анализ по результатам расчета гидродинамических нагрузок и коэффициентов силового взаимодействия для одно- и многокомпонентных конструкций методом численного эксперимента (ММДВ) для всего возможного диапазона скоростей потока, а также при вынужденных колебаниях и автоколебаниях конструкций, что существенно повышает его эффективность (рис. 2, 3);

– подход обеспечивает получение необходимых данных без привлечения сложного и дорогостоящего натурального физического эксперимента, ограничиваясь модельными опытными исследованиями на основании специально-разрабатываемой методики физического моделирования в соответствии с возможностями гидродинамического стенда по расходу, что значительно снижает трудоемкость и затраты на исследования;

– предлагаемый подход дает также возможность, основываясь на имеющихся и разрабатываемых в проекте алгоритмах и программах, получить оптимальные сочетания параметров конфигурации поперечного сечения обтекаемого потоком фрагмента тела (рис. 5, 6, 7);

– проводимый комплекс расчетов позволяет определить необходимые меры и соответствующие конструктивные изменения для требуемого регулирования жесткости системы, например, с введением дополнительных промежуточных опор и выбором зазоров.

Таким образом, предлагаемый подход предназначен для получения существенного повышения долговечности конструкции. Он найдет широкое применение в прогнозировании и мониторинге состояния комплексов и сооружений инфраструктуры РЖД на критических участках и является соответствующим мировому уровню исследовательских работ в данном направлении.

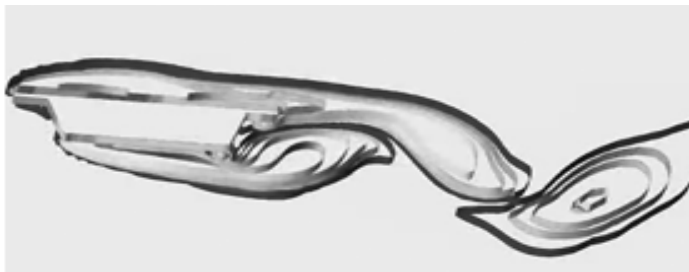


Рис. 5. Расчетная дорожка вихрей Кармана при обтекании моста через железную дорогу составляющей ветра, параллельной земле

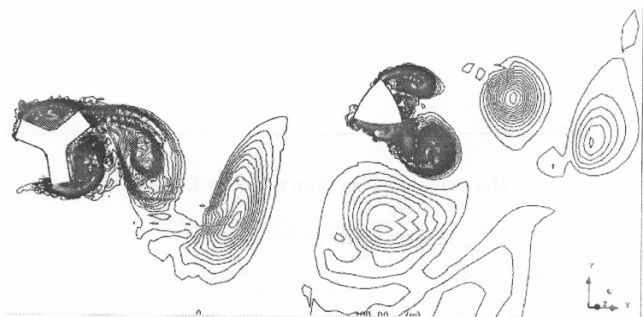


Рис. 6. Расчетная дорожка вихрей Кармана для двух тел сложной конфигурации при срывном обтекании потоком воздуха

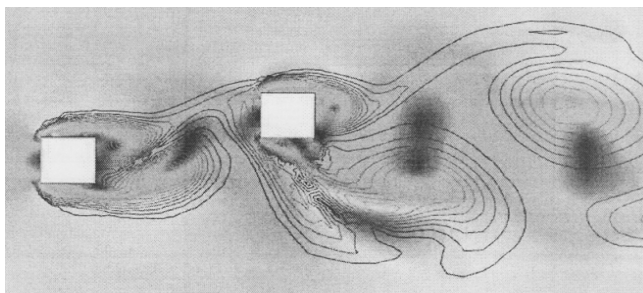


Рис. 7. Расчетная дорожка вихрей Кармана для двух цилиндров, имеющих квадратное сечение

Полученные результаты позволяют выявить зоны первоочередного мониторинга и диагностики обтекаемых ветром станционных конструкций, а также предложить перспективные пути и технологические мероприятия по повышению прочности, износостойкости и долговечности рассматриваемых ответственных конструкций.

В результате частотная отстройка в рассматриваемых случаях может быть надежно и корректно проведена, если для исследуемой обтекаемой конструкции решены следующие задачи:

- 1) определены числа Струхалия для тела, обтекаемого ветровым потоком;
- 2) определена область параметров, в которой максимально проявляется турбулентный механизм возбуждения колебаний;
- 3) проведена оценка интенсивности вибрации, возбуждаемой турбулентным механизмом.

Статья подготовлена по результатам исследования по гранту РФФИ №11-08-13119-офи-м-2011-РЖД.

Литература

1. БЕЛОСТОЦКИЙ А.М., ДУБИНСКИЙ С.И., КАЛИЧАВА Д.К., ПЕНЬКОВОЙ С.Б., ПОТАПЕНКО А.Л., КЛЕПЕЦ О.Ю. *Комплексное расчетное обоснование напряженно-деформированного состояния высотных многофункциональных комплексов* // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – №10. – С. 99–110..
2. ВАЛЬЕС Н.Г. *Расчет срывного обтекания цилиндра при автоколебаниях в потоке идеальной жидкости* // Механика жидкости и газа. – 1980. – С. 174–178.
3. ДУБИНСКИЙ С.И. *Численное моделирование ветровых воздействий на комплекс «Федерация» «Москва-Сити»* // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008. – Vol. 4, Issue 2. – С. 58–59. (рус.)
4. ДУБИНСКИЙ С.И. *ANSYS 8.0: обзор новых возможностей* // САПР и графика. – 2003. – №11. – С. 42–44.

5. ДУБИНСКИЙ С.И. *Программный комплекс ANSYS LS-DYNA 8.0 // САПР и графика.* – 2004. – №3. – С. 34–38.
6. ДУБИНСКИЙ С.И. *ANSYS и ANSYS/CivilFEM в строительстве // САПР и графика.* – 2004. – №12. – С. 75–77.
7. ДУБИНСКИЙ С.И. *Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии // САПР и графика.* – 2005. – №10. – С. 32–34.
8. ДУБИНСКИЙ С.И., СЕРЕБРЕННИКОВА А.В. *Численное моделирование ветровой аэродинамики в пешеходных зонах «высотной» застройки // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы, 12 ноября 2008, Москва, МГСУ.* – С. 259–266.
9. КАПЛУНОВ С.М., ВАЛЬЕС Н.Г., ГОРЕЛОВ Е.В., ШИТОВА Л.И. *Метод математического моделирования гидродинамических механизмов возбуждения вибраций теплообменных пучков труб // Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2008. – №3. – С. 107–112.
10. КАПЛУНОВ С.М., ВАЛЬЕС Н.Г., ШИТОВА Л.И. *Применение метода дискретных вихрей для расчета автоколебаний трубки в потоке жидкости. // Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2009. – №4. – С. 13–18.
11. КАПЛУНОВ С.М., МАХУТОВ Н.А., ВАЛЬЕС Н.Г., ФЕСЕНКО Т.Н., ПАНОВ В.А. *Перспективные направления расчетных исследований динамики и прочности многокомпонентных фрагментов конструкций водо-водяных РУ // Сборник тезисов VI Международная научно-техническая конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «Гидропресс».* – 2009. – С. 123.
12. ФРОЛОВ К.В., МАХУТОВ Н.А., КАПЛУНОВ С.М., СМИРНОВ Л.В. и др. *Динамика конструкций гидроаэроупругих систем / Под редакцией С.М. Каплунова и Л.В. Смирнова.* – М.: Наука, 2002. – 398 с.

CONDITION DIAGNOSTICS OF RUSSIAN RAILWAY INFRASTRUCTURE CONSTRUCTIONS UNDER INTENSIVE AERODYNAMIC LOADS FROM HIGH-SPEED TRAINS

Savely Kaplunov (Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonrvov of Russian Academy of Sciences), Doctor of Science, professor (kaplunov@imash.ru).

Natalia Valles (Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonrvov of Russian Academy of Sciences), Doctor of Science (nvalles@imash.ru).

Valery Fursov (Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonrvov of Russian Academy of Sciences), junior scientist (97dis@mail.ru).

Alexander Belostotsky (StadyO Science&Research Center), Doctor of Science, professor, Chief Director (stadyo@stadyo.ru).

Sergey Dubinsky (Moscow Federal Building University), Doctor of Science, assistant professor (sergdubpodlipki@mail.ru).

Abstract. We implement a composite procedure on the basis of combined approach for modeling aerodynamic loads on infrastructure elements (station constructions and designs, pedestrian crossings, bridges and tunnels) at passage of high-speed trains. We develop and implement in specialized software powerful methods of viscous liquid or gas currents modeling for research of aerohydrodynamic loads on a movable body of varying shape, and for problems of body movement in the presence of aerodynamic forces.

Keywords: aerodynamic loads, infrastructure elements, separated flow, Karman vortex streets, 3D-model of high-speed train, computational grid, turbulence model, discrete vortexes method, lift and drag force coefficients.