

# Расчет срывного обтекания неподвижных и колеблющихся тел в 2D и 3D – постановке

Каплунов С. М., Вальес Н.Г., Самолысов А. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской Академии Наук*

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

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

Первый из методов – один из наиболее мощных и современных программных комплексов гидрогазодинамических расчетов ANSYS CFD.

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 использование комбинации этих двух подходов коллективом авторов и состоит основная идея и оригинальность предлагаемой методологии.

## Ключевые слова

Модернизированный метод дискретных вихрей, аэродинамические силы, безразмерная частота срыва вихрей, безразмерная скорость потока, Ansys CFD

## 1 Введение

В работе представлена эффективная модель вихревого возбуждения для расчета срывного обтекания тел при больших числах Re (модель, совмещающая идеальную среду и нестационарный вихревой слой на теле и за ним) – модернизированный метод дискретных вихрей, позволяющий в реальном времени и наглядно (анимация) представить картину срывного обтекания цилиндрических поверхностей с разными профилями сечения, находящихся в поперечном потоке жидкости или газа.

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 [1,2].

## 2 Теоретическая часть

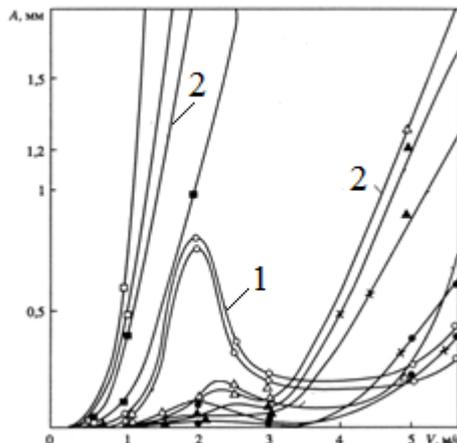
### 2.1 Механизмы возбуждения аэродинамических сил и колебаний конструкции

Сооружения, помещенные в воздушный поток, вызванный прохождением скоростного поезда Сапсан, подвергаются действию аэродинамических сил, которые можно определить методом численного эксперимента или с помощью экспериментальных исследований.

При этом с плохообтекаемых конструкций срываются вихри, вызывающие на них нестационарные аэродинамические силы. Эти силы при малом сопротивлении конструкции могут вызвать вибрацию, опасную для конструкции и значительно увеличивающую силы лобового сопротивления и подъемную силу.

Задачи, возникающие при взаимодействии вихревого следа и упругой конструкции, можно разделить на две группы: автоколебания конструкции, вызванные нестационарными силами от вихревого следа и аэродинамическая неустойчивость упругой конструкции в потоке (рис.1.). К первой группе задач можно отнести задачи о вибрации в потоке газа плохообтекаемых стоек, различных трубопроводов, тросов, башенных устройств, дымовых труб и т.д., а ко второй группе - задачи об устойчивости консольных цилиндрических конструкций с наделками, дымовых труб с очистительными устройствами. Такие колебания в ряде случаев называются галопированием.

Срывной флаттер – это крутильные колебания аэродинамической поверхности как системы с одной степенью свободы, возбуждаемые за счет нелинейных характеристик подъемной силы в окрестностях наступления срыва потока или в условиях потери подъемной силы. Это явление также наблюдается в конструкциях, имеющих широкие поверхности, при обтекании которых происходит срыв потока в зависимости от угла атаки набегающего потока.



**Рис.1.** Механизм возбуждения конструкций в потоке воздуха. 1-автоколебания конструкции, 2-аэродинамическая неустойчивость конструкции

При детальном изучении флаттера почти во всех случаях обнаруживаются нелинейные аэродинамические эффекты. Однако в ряде ситуаций оказалось возможным успешно решить задачу на основе линейных аналитических подходов потому, что именно в начальной стадии процесса, которую можно рассматривать как характеризующуюся лишь небольшими амплитудами колебаний, происходит разделение устойчивого и неустойчивого режимов. Это дает возможность проводить анализ флаттера на основе обычного рассмотрения устойчивости линейных упругих систем (рис.1.) Задачи галопирования, срывного флаттера также могут быть решены с помощью модернизированного метода дискретных вихрей.

Применение современных программных средств и мощной компьютерной техники в рамках ANSYS позволяет отечественным специалистам решать поставленные задачи с необходимой точностью и достоверностью в 3D- постановке. Ввиду крайней трудоемкости данных расчетов и невозможности их применения в случае колебания конструкции или изменения ее формы даже с применением многопроцессорной техники, представляется целесообразным параллельно использовать большой опыт аналитических расчетов и классических методов, накопленный отечественной научной школой.

## 2.2 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.

Оценка ветровой нагрузки, действующей на неподвижный пешеходный мост (рис.2.) рассчитывалась авторами методом дискретных вихрей и приведена на рис.3,4.

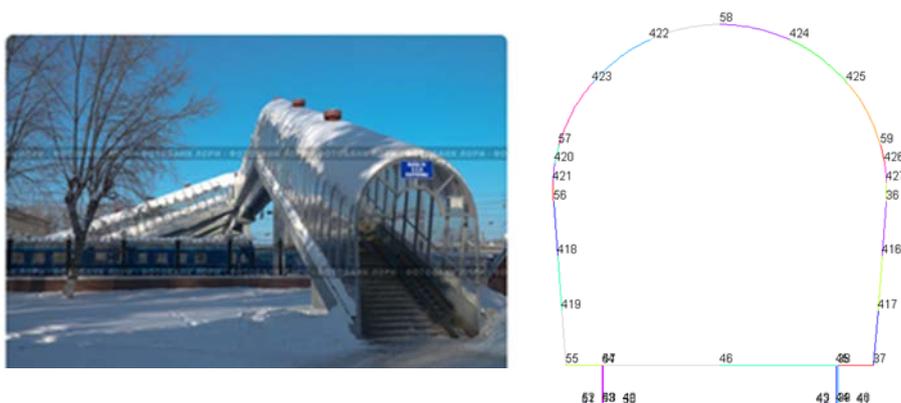


Рис.2. Пешеходный мост через железнодорожные пути

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.5.).

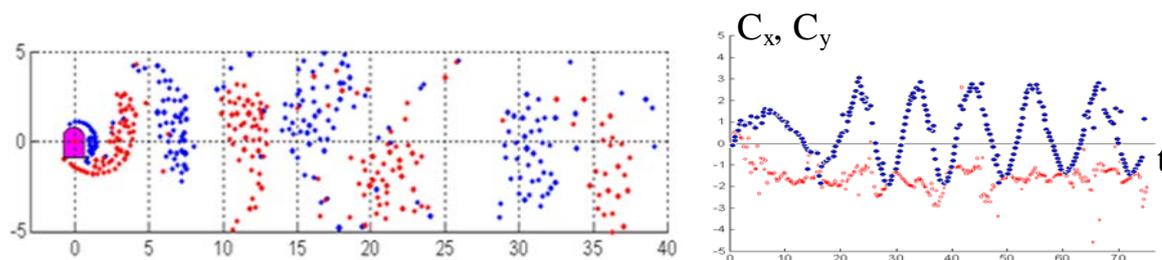


Рис.3. Расчет пешеходного моста методом дискретных вихрей. Аэродинамические силы, действующие на пешеходный мост

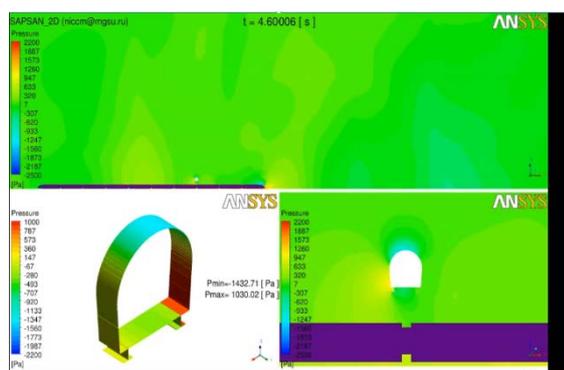
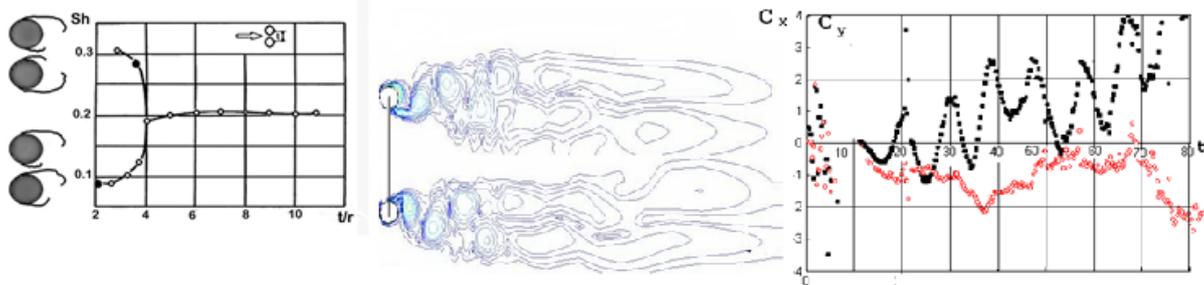


Рис.4. Расчетное определение давления на пешеходный мост в 3D - постановке

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.

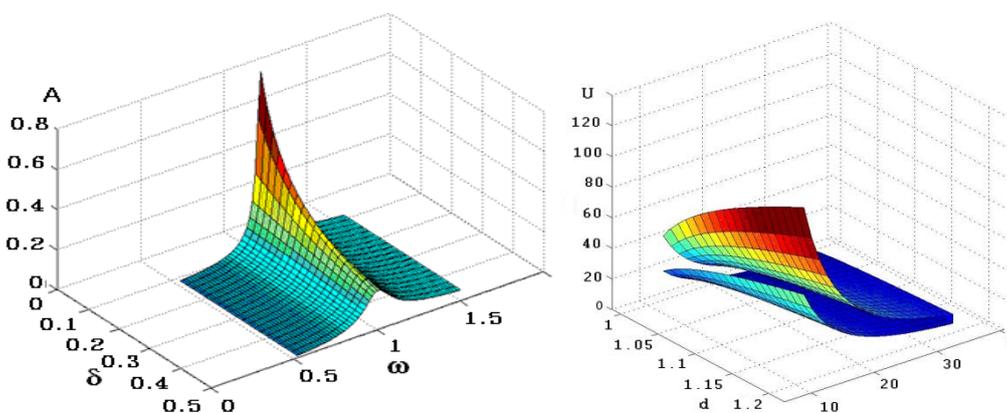


**Рис. 5.** Частота срыва вихрей с двух цилиндров, расположенных перпендикулярно потоку (● -расчет, ○ - эксперимент [6]). Изменение расчетных коэффициентов гидродинамических сил во времени для двух трубок при поперечном обтекании

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 [3].

Впервые авторами 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.

В работе 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.6.).



**Рис.6.** Области опасных состояний. Амплитуда автоколебаний газовой трубы в воде в зависимости от декремента колебаний  $\delta$  и безразмерной скорости  $\omega$  обтекания потоком. 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.8).

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 (рис.3,4.).

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.7). 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.

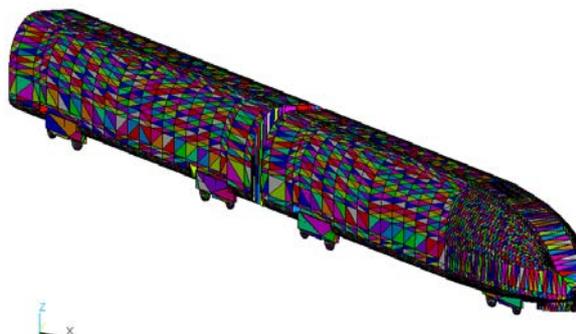


Рис.7. Геометрическая поверхностная модель передних вагонов Сапсана

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 важные для проектирования, эксплуатации и прогнозирования ресурса параметры.

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.

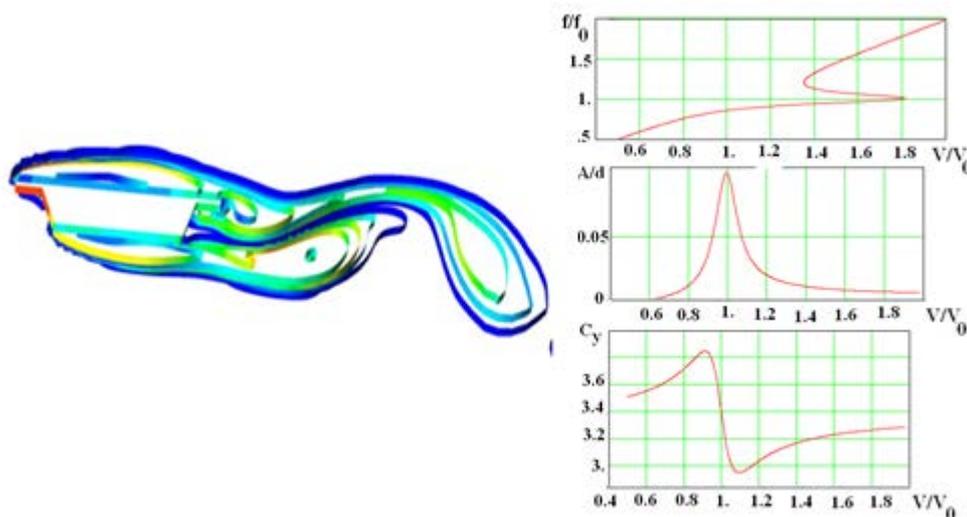


Рис.8. Расчет колебаний моста, находящегося под действием срывного обтекания. Расчетная амплитуда автоколебаний моста в зависимости от безразмерной скорости обтекания ветром  $V/V_0$  ( $V_0=f_0d/Sh_0$ ).

Безразмерная частота срыва вихрей в зависимости от безразмерной скорости обтекания ветром.

Аэродинамическая сила  $C_y$ , действующая на мост в зависимости от безразмерной скорости обтекания ветром.

### 3 Выводы. Анализ возможностей практического использования моделей

Предлагаемый подход имеет следующие преимущества и особенности:

- комбинированный подход является оригинальным в принципе самой комбинации двух прогрессивных расчетных методов для эффективного решения задач аэродинамики в 2D и 3D - 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.3,4,8).

- 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.3,6)

Таким образом, предлагаемый подход предназначен для получения существенного повышения долговечности конструкции, 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.

## Литература

- [1] С.М. Каплунов, Н.Г. Вальес, Е.В. Горелов, Л.И. Шитова. Метод математического моделирования гидродинамических механизмов возбуждения вибраций теплообменных пучков труб. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2008. № 3. стр.107-112.
- [2] С.М. Каплунов, Н.Г. Вальес, Н.А. Ченцова, В.Ю. Фурсов. Математическая модель гидроупругого механизма возбуждения вибраций системы плохообтекаемых тел в поперечном потоке жидкости //М., *Теплоэнергетика*, № 6, 2012, с. 44-49.
- [3] С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей М., Физико-математическая литература, 1995, 365 с.
- [4] С.И. Девнин. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник.- Л.: Судостроение, 1983.- 320 с.
- [5] Девнин С.И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании. Л., *Судостроение*, 1975. 190 с.
- [6] Здравкович. Обзор исследований интерференции между двумя круглыми цилиндрами при различном их взаимном расположении, *Теоретические основы инженерных расчетов*, 1977, №4, с. 119, из-во Мир.

### **The calculation of vortex shedding flowpast of fixed and oscillating bodies**

**Abstract.** *The work is devoted to the development and implementation in the form of complexes of programs of effective methods for simulation of flows of a viscous fluid or gas for research aerohydrodynamic loads on the body, committing arbitrary movement, including the change of the form of and for the solution of the problems of motion of bodies under the action of aerodynamic forces.*