

УДК 531.8: 533.6

doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-21-30

Численное моделирование динамики движения механизма в потоке несжимаемой среды с использованием метода вихревых петель

Г.А. Щеглов, С.А. Дергачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Numerical simulation of the mechanism motion dynamics in the incompressible medium flow using the vortex loop method

G.A. Shcheglov, S.A. Dergachev

Bauman Moscow State Technical University

Решена актуальная задача разработки нового программного комплекса, предназначенного для моделирования взаимодействия механизма или его элементов с потоком несжимаемой среды. В этом комплексе для расчета динамики механизма использована программа Project Chrono с открытым исходным кодом, а для вычисления обтекания тела и нестационарных аэрогидродинамических нагрузок — программа VM3D, реализующая бессеточный лагранжев метод вихревых петель. Предложен алгоритм решения связанной задачи взаимодействия конструкции с потоком. Работа программного комплекса продемонстрирована на примере четырехзвенного механизма устройства для преобразования возобновляемой энергии, который можно использовать при проектировании малых ветро- и гидроэлектростанций. Показано, что в зависимости от параметров механизма и набегающего потока кривошип способен совершать затухающие колебания или авторотацию. Найден диапазон мощности, который можно получить в режиме устойчивого вращения выходного звена. Полученные результаты могут быть применены для проектирования малых ветро- и гидроэлектростанций.

Ключевые слова: динамика механизма, четырехзвенный механизм, вычислительная гидродинамика, метод вихревых петель, несжимаемая среда, пространственное обтекание тел

The urgent problem of developing new software package designed to simulate the processes of interaction between a mechanism or its elements and the incompressible medium flow was solved. In this complex, the open source Project Chrono software program was used to calculate the mechanism dynamics, and the VM3D program implementing the meshless Lagrangian method of vortex loops was introduced to calculate the flow around the body and the unsteady aerohydrodynamic loads. An algorithm for solving the related structure problem and flow interaction was proposed. The software package operation was demonstrated using the example of a device mechanism for converting the renewable energy, which could be used in the context of designing small wind and hydroelectric power plants. The paper shows that the crank is capable of damped oscillations or autorotation depending on the mechanism parameters and the oncoming flow. The power range that could be obtained in the stable rotation mode of the output link was found. Data obtained could be used to design small wind and hydroelectric power plants.

Keywords: mechanism dynamics, four-link mechanism, computational fluid dynamics, vortex loop method, incompressible medium, spatial flow around bodies

В ходе решения инженерных задач прикладного характера при проектировании авиационной, автомобильной, морской техники и энергетического оборудования возникает необходимость моделирования взаимодействия механизма или его элементов с потоком жидкости или газа в условиях, когда сжимаемостью рабочей среды (РС) можно пренебречь [1, 2].

Внедрение цифровых технологий на этапе выбора основных проектных параметров механизма определяет актуальность численного решения задач взаимодействия его звеньев с потоком РС. Специализированные программные комплексы (ПК) моделирования динамики механизмов (Multibody Dynamics simulation — MBD), распространяемые как по коммерческим лицензиям (ADAMS, NX motion, SIMULA MBD и др.), так и по открытым типа GNU GPL (MBDyn, Project Chrono), имеют в своем составе модули решения задачи взаимодействия тел с потоком (Fluid–Structure Interaction — FSI) [1].

Эти модули обеспечивают либо непосредственный расчет аэрогидродинамических нагрузок, либо связь с пакетами вычислительной гидродинамики (Cradle, XFLOW, OpenFOAM и др.) [3, 4], использующими метод конечного объема, метод решеток Больцмана, метод сглаженных частиц, метод вихревых элементов и др.

Каждый из методов вычислительной гидродинамики, обладая своими достоинствами, имеет ограничения в применении. Сеточные методы при расчете нестационарных нагрузок на тела, подверженные большим перемещениям и деформациям, требуют значительных вычислительных ресурсов, необходимых для перестроения расчетных сеток и переаппроксимации полей.

Бессеточные методы лишены этого недостатка, но менее развиты. В частности, бессеточные вихревые лагранжевы методы активно применяют для моделирования работы механизмов в случае двумерного обтекания их звеньев [5, 6]. Однако для трехмерного течения потока эти методы используют значительно реже [7], что связано с трудностями построения расчетных схем при моделировании пространственного отрывного обтекания тел.

Относительно недавно предложена новая модификация метода вихревых элементов — метод вихревых петель (ВП) [8], который реализован в ПК VM3D [9]. Разработанный метод позволяет эффективно рассчитывать нестационарные аэрогидродинамические нагрузки, дей-

ствующие на тела, совершающие значительные перемещения в неограниченном пространстве.

Цель работы — построение на базе программы VM3D ПК для численного моделирования динамики движения механизмов, взаимодействующих с потоком несжимаемой РС.

В качестве MBD-системы выбран ПК с открытым исходным кодом Project Chrono, активно применяемый для решения задач FSI [10–12]. Использование открытого ПК предоставляет пользователям широкие возможности по верификации и модификации разрабатываемых приложений.

Работа ПК показана на примере четырехзвенного механизма устройства для преобразования возобновляемой энергии [13], который можно использовать при проектировании малых ветро- и гидроэлектростанций [14], а также машин, способных двигаться против ветра [15].

Постановка задачи и метод решения. Четырехзвенный механизм, кинематическая схема которого показана на рис. 1, предназначен для получения энергии от потока несжимаемой РС (воды или воздуха при дозвуковом обтекании), движущейся с постоянной скоростью V_∞ . Устройство состоит из обтекаемого тела (ОТ) 6, закрепленного с помощью кронштейна 5 на шатуне 1, который связан со стойкой 3, кривошипом 2 и рычагом 4. Соединения между звеньями являются идеальными цилиндрическими шарнирами с одной вращательной степенью свободы.

На ведущее звено — шатун — передается нестационарная аэродинамическая нагрузка от тела. На валу кривошипа, служащего выходным звеном, установлено устройство преобразования энергии, состоящее из маховика и генератора. В качестве обобщенной координаты выбран угол поворота кривошипа φ (его положительное направление отсчитывается против хода часовой стрелки). Расчеты проведены без учета влияния силы тяжести.

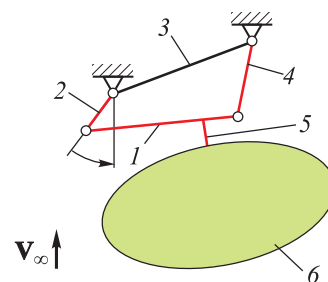


Рис. 1. Кинематическая схема исследуемого четырехзвенного механизма

Принято допущение, что с потоком РС взаимодействует только поверхность ОТ, которое представляет собой прямой цилиндр высотой h , имеющий эллиптическое сечение с большой a и малой b полуосями. В процессе движения РС вокруг подвижного плохообтекаемого тела возникает интенсивное вихреобразование, определяющее нестационарные нагрузки, действующие на ОТ со стороны потока, и режим движения механизма.

Задача FSI включает в себя две взаимосвязанных подзадачи: механическую и аэродинамическую. Механическая подзадача описывается уравнениями движения механизма с одной вращательной степенью свободы — углом поворота кривошипа $\varphi(t)$ и приведенным моментом инерции J под действием суммарного момента внешних сил M_e и момента аэродинамических сил M_a

$$\varphi = \omega; J\dot{\omega} = M_e + M_a(p, t), \quad (1)$$

где ω — угловая скорость кривошипа; p — давление РС; t — время.

Заданы продолжительность исследуемого режима T_k

$$0 \leq t \leq T_k$$

и начальные условия

$$\varphi(0) = \varphi_0; \quad \omega(0) = \omega_0. \quad (2)$$

Аэродинамическая подзадача описывает обтекание подвижного абсолютно жесткого тела (поверхность которого обозначена как B) потоком несжимаемой РС и включает в себя уравнения неразрывности и сохранения импульса РС в безграничном пространстве

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nu \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{\nabla p}{\rho_\infty}, \quad (3)$$

где \mathbf{V} — нестационарное трехмерное поле скоростей, $\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$, \mathbf{r} — радиус-вектор точки; p — поле давления РС, $p = p(\mathbf{r}, t)$; ν и ρ_∞ — вязкость и плотность РС.

Заданы граничные условия отсутствия возмущений на бесконечности

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow \infty} \mathbf{V}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{V}_\infty = \text{const}; \\ \lim_{r \rightarrow \infty} p(\mathbf{r}, t) &= p_\infty = \text{const} \end{aligned} \quad (4)$$

и условие прилипания в точках на обтекаемой поверхности $\mathbf{r}_B(\varphi, \omega, t) \in B$

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}_B, t) = \mathbf{V}_B(\varphi, \omega, t). \quad (5)$$

Известно начальное распределение скоростей в области течения потока:

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, 0) = \mathbf{V}_0(\mathbf{r}). \quad (6)$$

Подзадачи связаны через граничное условие (5) и распределение давления РС на обтекаемой поверхности, определяющее момент аэродинамических сил $M_a(p, t)$.

Задача (1)–(6) решалась численно в предположении, что инерционные характеристики ОТ существенно превышают таковые для вытесняемого объема РС. Это позволило применить пошаговую схему связывания подзадач FSI, согласно которой каждый шаг расчета по времени подразделен на два подшага. На них уравнения динамики (1) интегрировались при известных значениях аэродинамических нагрузок, а моделирование течения потока (3)–(5) выполнялось для ОТ в заданном положении φ с известной угловой скоростью ω .

Для автоматизированного формирования и численного интегрирования уравнений (1) механической подсистемы использована мультиплатформенная объектно-ориентированная библиотека Chrono Engine с открытым исходным кодом, реализованная на языке C++ [16]. В этой библиотеке движение твердого тела (звена механизма) описывается в трех измерениях относительно инерциальной мировой системы отсчета положением центра масс и матрицей ориентации связанной системы координат звена (frame) относительно центра масс.

Неподвижное звено (стойка) и ОТ смоделировано объектом ChBody, а цилиндрические шарниры — ChLinkLockRevolute. Кронштейн соединен с ОТ и шатуном жесткой связью ChLinkLockLock. Для соединения кривошипа со стойкой использована связь, моделирующая привод с моментом силы ChLinkMotorRotationTorque. Эта связь имитировала нагрузку рабочего органа, например электрогенератора.

Тормозящий момент внешних сил условно принят прямо пропорциональным угловой скорости кривошипа

$$M_e = -c\omega, \quad (7)$$

где c — коэффициент пропорциональности, варьируемый в процессе расчета, $c > 0$.

Интегрирование по времени выполнено с помощью решателя ChTimeStepper. Шаг интегрирования был постоянным и равным $\Delta t_m = 0,01$. Решатель ChSolverMINRES использован для численного решения систем алгебра-

ических уравнений, а программа VM3D — уравнений аэродинамической подсистемы [9]. Программа, написанная на языке C++, реализует бессеточный лагранжев метод ВП.

Допущение о несжимаемости РС позволило перейти от системы (2) к описанию движения РС через эволюцию завихренности

$$\Omega(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{V}(\mathbf{r}, t).$$

Поле скоростей в области течения потока восстанавливалось по полю завихренности с применением закона Био — Савара, а поле давления — с помощью аналога интеграла Коши — Лагранжа [17]. В данном методе использовано предположение, что обтекание характеризуется большими числами Рейнольдса, когда влияние сил инерции в РС существенно превышает влияние сил, вызываемых вязкостью РС.

Это позволило ввести упрощающее предположение о том, что влияние вязкости проявляется только в двух процессах: рождении завихренности в тонком пристеночном слое вблизи поверхности тела B и перезамыкании вихревых нитей, сблизившихся на малое расстояние в области течения потока. За исключением указанных случаев, течение потока во внешней области принято невязким, что позволило считать вихревые линии замороженными в жидкость и описывать эволюцию завихренности в терминах движения лагранжевых частиц.

Эволюция завихренности моделировалась с использованием ВП — замкнутых вихревых нитей. Все ВП имели одинаковую интенсивность Γ . Петля под номером k аппроксимировалась ломанной линией и определялась принадлежащими ей вершинами N_k , которые рассматривались как лагранжевы маркеры. Координаты маркеров задавались радиус-векторами \mathbf{r}_{ki} .

Движение вихревой нити описывалось перемещением маркеров по траекториям жидких частиц, задаваемым системой обыкновенных дифференциальных уравнений с соответствующими начальными условиями в месте рождения ВП:

$$\frac{d\mathbf{r}_{ki}}{dt} = \mathbf{V}_{ki}; \quad \mathbf{r}_{ki}(0) = \mathbf{r}_{ki}^0; \quad (8)$$

$$k = 1, \dots, N_p; \quad i = 1, \dots, N_k,$$

где \mathbf{V}_{ki} — скорость маркера, вычисляемая как сумма скорости невозмущенного потока и скорости, индуцируемой всеми вихревыми отрез-

ками по закону Био — Савара; N_p — количество ВП; N_k — число маркеров ВП.

Система (8) интегрировалась численным методом Эйлера первого порядка точности с шагом Δt_a . Особенность системы (8) — переменная размерность: на каждом шаге интегрирования количество ВП N_p и число их маркеров N_k изменялось вследствие нескольких процедур:

- для удовлетворения граничного условия (5) на поверхности ОТ генерировались новые ВП;
- для моделирования перезамыкания ВП близкорасположенные участки ВП перестраивались, в результате чего ВП объединялись или разделялись;
- для повышения вычислительной устойчивости расчета проводились сглаживание ВП и их переаппроксимация отрезками равной длины;
- для коррекции погрешностей численного интегрирования участки ВП, проникшие в ОТ, заменялись участками, построенными на обтекаемой поверхности.

Генерация ВП с интенсивностью Γ проводилась по линиям уровня плотности потенциала двойного слоя, восстановленного на основе решения граничного интегрального уравнения для интенсивности вихревого слоя, полученного с использованием T-схемы [18]. Указанные операции выполнялись с применением сетки из треугольных панелей, построенной на поверхности ОТ. На этой же сетке восстанавливалось распределение давления РС, интегрированием по которому вычислялись главный вектор и момент аэродинамических сил, которые затем приводились к моменту M_a . Более подробное описание метода ВП можно найти в работе [8].

Принципиальная схема взаимодействия аэродинамической и механической подзадач показана на рис. 2, где процедуры первой выделены синим цветом, а процедуры второй — зеленым. Обе подзадачи реализовывались как библиотеки, к которым обращался главный программный модуль.

Для осуществления пошаговой схемы связывания использовались соотношения между шагами интегрирования по времени аэродинамической Δt_a и механической Δt_m подсистем

$$n_s \Delta t_a = \Delta t_m,$$

где n_s — число шагов расчета механической подсистемы.

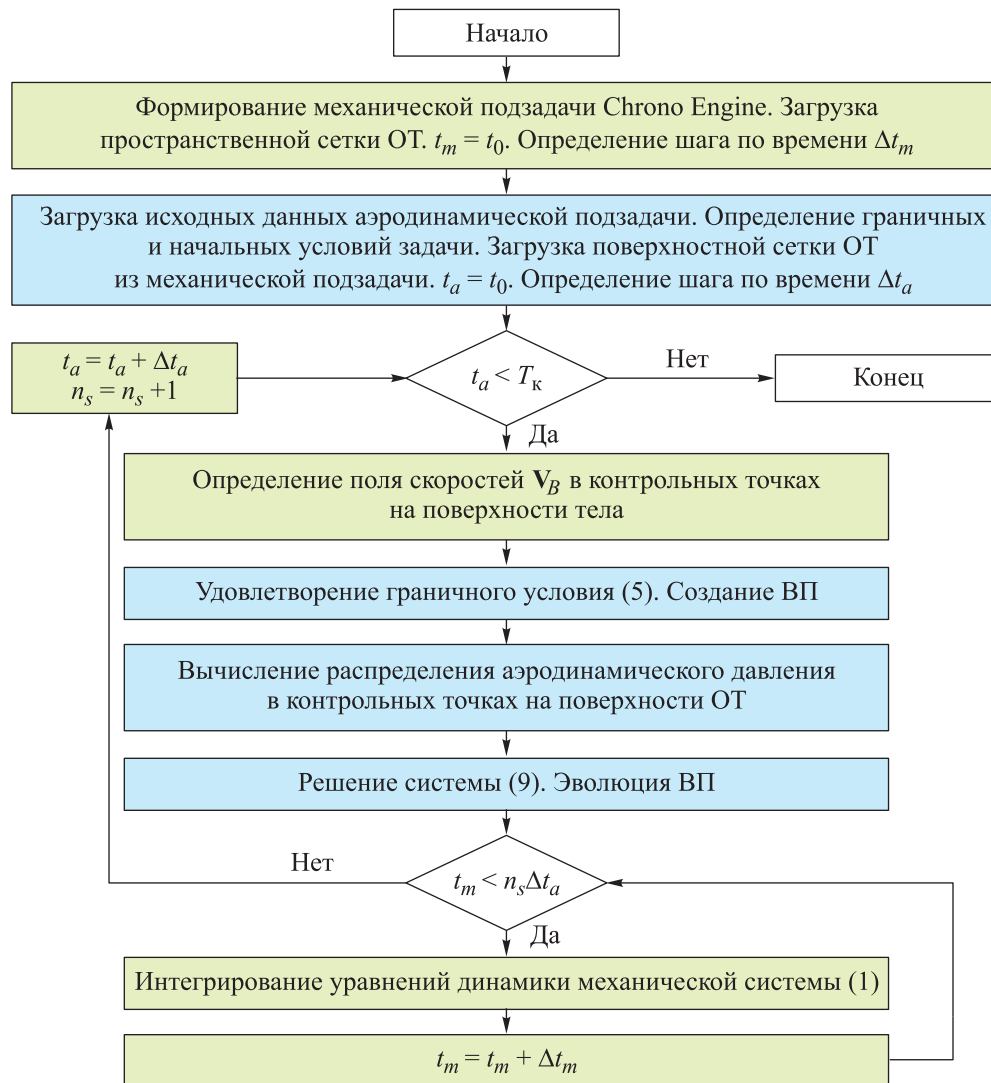


Рис. 2. Схема взаимодействия аэродинамической и механической подзадач

Таким образом, за один шаг расчета аэродинамической подсистемы выполняется n_s шагов расчета механической подсистемы.

В библиотеке Chrono Engine тело моделировалось абсолютно жестким объектом. Для этого объекта формировалась пространственная тетраэдрическая сетка, по которой на поверхности строилась треугольная сетка метода ВП, не рестраиваемая в процессе расчета.

Результаты моделирования. В расчетах модельной задачи использованы безразмерные параметры. Обтекаемым телом (воспринимающей поверхности) в вычислительной модели являлся абсолютно жесткий эллиптический цилиндр удлинением $h/(2a)=5$ с соотношением большой и малой полуосей эллипса $a/b=2$. При вычислении массы и тензора

инерции ОТ плотность его материала составляла 50.

Характеристики РС: давление и скорость на бесконечном удалении от тела $p_\infty = 1$, $V_\infty = \{0, 1, 0\}$; плотность $\rho_\infty = 1$. Характеристики ВП: радиус сглаживания поля скорости $\varepsilon = 0,04$; интенсивность $\Gamma = 0,0976$; длина отрезков петли — 0,04; расстояние перезамыкания — 0,08. Сетка на поверхности ОТ состояла из 956 узлов и 1908 панелей, высота рождения ВП над поверхностью $\Delta = 0,006$. Шаг расчета по времени аэродинамической подсистемы $\Delta t_a = 0,04$, шаг расчета по времени механической подсистемы $\Delta t_m = 0,01$, число шагов ее расчета $n_s = 4$.

Расчеты с использованием технологии распараллеливания OpenMP проводились на компьютере относительно низкой производительности с двухъядерным процессором Intel Core

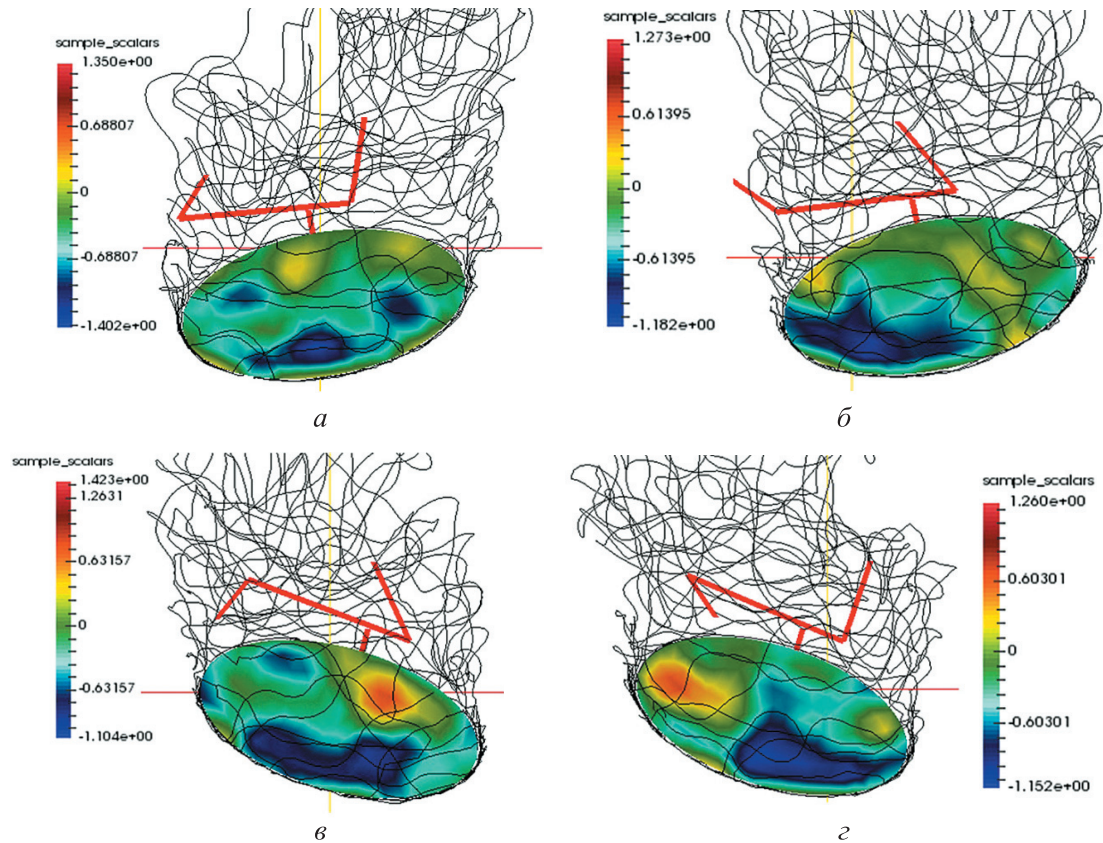


Рис. 3. Фазы положения четырехзвенного механизма в процессе вращения кривошипа: а — начальное положение; б и г — первая и третья четверть периода; в — половина периода

15-4200 частотой 1,6...2,3 ГГц. Для интегрирования приходного режима продолжительностью около 4400 шагов расчета потребовалось примерно 58 ч. Основное время вычислений занимал расчет эволюции ВП. В конце расчета количество обрабатываемых ВП составляло около 450, а общее количество вихревых отрезков в них — около 37 000.

Результаты расчета связанной задачи за один период движения четырехзвенного механизма приведены на рис. 3. Начальное положение показано на рис. 3, а, фазы положения механизма в процессе вращения кривошипа — на рис. 3, б-г. Здесь красными отрезками обозначены звенья механизма (см. рис. 1), черными тонкими линиями — ВП, образующие вихревой след. Цветная эпюра показывает распределение интенсивности потенциала двойного слоя на ОТ.

Полученные в расчете пространственные вихревые следы имеют сложную структуру. Примеры следа, состоящего из ВП, образующихся при обтекании ОТ в разные моменты времени, приведены на рис. 4, где черные линии — ВП. Видно, что за цилиндром образу-

ется дорожка вихревых сгустков, что определяет пульсирующий характер нагрузок, воздействующих на него со стороны потока.

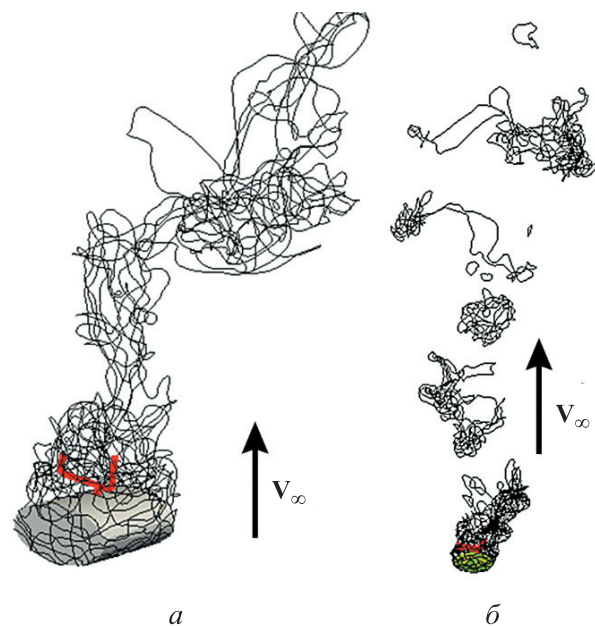


Рис. 4. Модель развития вихревого следа за ОТ: а — шаг 150 ($t = 6$); б — шаг 800 ($t = 32$)

Анализ результатов расчета показал, что в зависимости от параметров механизма и набегающего потока кривошип может совершать затухающие колебания или непрерывное вращение (авторотацию).

Для авторотации выходного звена (кривошипа и связанной с ней нагрузки от электрогенератора) требуется автоколебательное движение ОТ. Это можно обеспечить выбором приведенного момента инерции J в системе (1) с помощью маховика, присоединенного к кривошипу. Для создания достаточного момента инерции в оригинальном механизме на маховике закреплен балансир [13].

Зависимости угловой скорости кривошипа ω от продолжительности его устойчивого вращения t при приведенном моменте инерции $J = 1, 10$ и 100 и отсутствии тормозящего момента внешних сил (7), т. е. при коэффициенте $c = 0$, приведены на рис. 5.

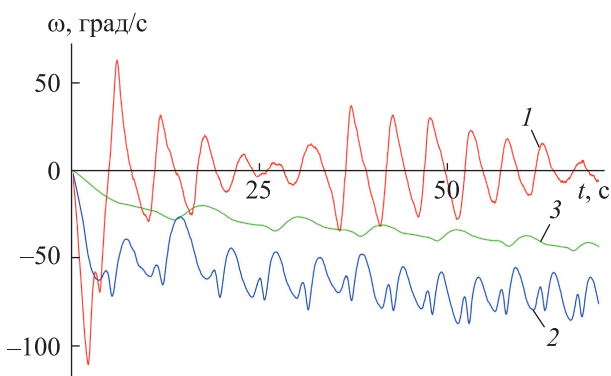


Рис. 5. Зависимости угловой скорости кривошипа ω от продолжительности его устойчивого вращения t при приведенном моменте инерции $J = 1$ (1), 10 (2), 100 (3) и коэффициенте $c = 0$

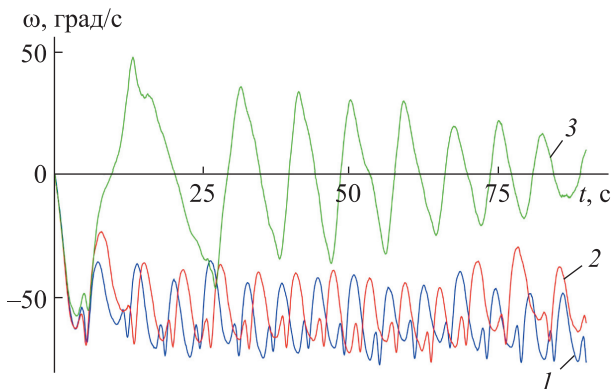


Рис. 6. Зависимости угловой скорости кривошипа ω от продолжительности его устойчивого вращения t при приведенном моменте инерции $J = 10$ и коэффициенте $c = 0,25$ (1), $0,45$ (2) и $0,55$ (3)

Видно, что при моменте инерции $J = 1$ не происходит вращения кривошипа (кривая 1). Выходное звено совершает малые затухающие колебания вблизи устойчивого положения равновесия $\varphi \approx 138^\circ$. Вращение выходного звена возникает при увеличении момента инерции в 10 раз (кривая 2), причем вращение кривошипа является неравномерным. Дальнейшее увеличение момента инерции ($J = 100$) сглаживает пульсации угловой скорости кривошипа (кривая 3).

При наличии тормозящего момента внешних сил, когда четырехзвенный механизм выполняет полезную работу, с увеличением коэффициента c угловая частота кривошипа несколько снижается, как показано на рис. 6 (кривые 1 и 2).

Зависимости мощности N , вычисленной по формуле $N = M_e \omega$, от продолжительности устойчивого вращения кривошипа при коэффициенте $c = 0,25$ и $0,45$ приведены на рис. 7.

Анализ полученных результатов показал, что при выбранной модели тормозящего момента внешних сил (7) с увеличением коэффициента c от $0,25$ до $0,45$ (в области устойчивой работы механизма) выходная мощность увеличивается на 28 %. При $c = 0,25$ среднее значение выходной мощности составляет $0,290$, при $c = 0,45$ — $0,369$.

Как видно из рис. 3, ОТ совершает колебания поперек потока, частота которых зависит от нагрузки на выходное звено. При приведенном моменте инерции $J = 10$ и отсутствии тормозящего момента внешних сил частота колебаний составляет около $0,2$ Гц. При коэффициенте $c = 0,25$ частота колебаний снижается до $0,18$ Гц, а при $c = 0,45$ — до $0,16$ Гц. При этом

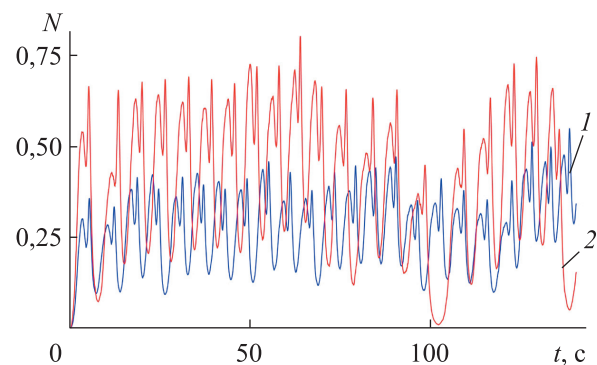


Рис. 7. Зависимости мощности N от продолжительности устойчивого вращения кривошипа t при коэффициенте $c = 0,25$ (1) и $0,45$ (2)

угловая скорость кривошипа утрачивает стабильность, и возрастает вероятность внезапной остановки механизма. При достижении критического коэффициента $c \approx 0,55$ кривошип перестает устойчиво вращаться (см. рис. 6, кривая 3).

Выводы

1. Разработан программный комплекс, адаптированный к взаимодействию ПК VM3D с открытым ПК Project Chrono. Полученное программное обеспечение позволяет с достаточно высоким быстродействием решать нестационарные задачи взаимодействия звеньев механизма с потоком, в которых можно пренебречь свойствами сжимаемости РС.

2. В рассмотренном модельном примере, исследованном с помощью разработанного ПК, найден диапазон мощности, который можно получить в режиме устойчивого вращения выходного звена четырехзвенного механизма устройства для преобразования возобновляемой энергии. Полученную информацию можно использовать для проектирования малых ветро- и гидроэлектростанций.

3. Разработанный ПК позволяет проводить расчет не только плоских механизмов, но и пространственных (в том числе с высшими кинематическими парами), содержащих в своем составе тела произвольной формы с замкнутой поверхностью, поэтому дальнейшие исследования будут направлены на изучение более сложных расчетных схем.

Литература

- [1] Bungartz H.-J., Schäfer M., ed. Fluid-structure interaction. Modelling, simulation, optimization. Springer, 2006. 394 p.
- [2] Морозов В.И., Пономарев А.Т., Рысев О.В. *Математическое моделирование сложных аэроупругих систем*. Москва, Физматлит, 1995. 736 с.
- [3] Co-simulation with Hexagon CAE solutions. *www.cradle-cfd.com*: веб-сайт. URL: <https://www.cradle-cfd.com/product/msc.html> (дата обращения: 19.06.2023).
- [4] Solids4foam. веб-сайт. URL: <https://www.solids4foam.com/> (дата обращения: 23.12.2023).
- [5] Marchevsky I., Sokol K., Ryatina E. et al. The VM2D open source code for two-dimensional incompressible flow simulation by using fully Lagrangian vortex particle methods. *Axioms*, 2023, vol. 12, no. 3, art. 248, doi: <https://doi.org/10.3390/axioms12030248>
- [6] Andronov P.R., Dosaev M.Z., Dynnikova G.Y. et al. Modeling of oscillating wind turbine. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, no. 38, no. 4, pp. 383–387, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618809040153>
- [7] Тушев О.Н., Щеглов Г.А. Численное моделирование аэроупругой динамики воздушного старта при наличии случайного разброса параметров аэродинамического нагружения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 22–33, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2015-1-22-34>
- [8] Dergachev S.A., Marchevsky I.K., Shcheglov G.A. Flow simulation around 3D bodies by using Lagrangian vortex loops method with boundary condition satisfaction with respect to tangential velocity components. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2019, vol. 94, art. 105374, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105374>
- [9] Марчевский И.К., Щеглов Г.А., Дергачев С.А. VM3D — программный комплекс для моделирования пространственных течений несжимаемой среды вихревыми методами. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ 2022660838. Заявл. 10.06.2022.
- [10] Tasora A., Serban R., Mazhar H. et al. Chrono: an open source multi-physics dynamics engine. In: HPCSE 2015. Springer, 2015, pp. 19–49, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40361-8_2
- [11] Wei Z., Edge B.L., Dalrymple R.A. et al. Modeling of wave energy converters by GPUSPH and Project Chrono. *Ocean Eng.*, 2019, vol. 183, pp. 332–349, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.029>
- [12] Martínez-Estévez I., Domínguez J.M., Tagliafierro B. et al. Coupling of an SPH-based solver with a multiphysics library. *Comput. Phys. Commun.*, 2023, vol. 283, art. 108581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108581>
- [13] Стрекалов С.Д., Мишарев Г.М., Стрекалова Л.П. и др. *Устройство для преобразования возобновляемой энергии*. Патент РФ 2293212. Заявл. 04.08.2005, опубл. 10.02.2007.

- [14] Klimina L., Dosaev M., Selyutskiy Y. Asymptotic analysis of the mathematical model of a wind-powered vehicle. *Appl. Math. Model.*, 2017, vol. 46, pp. 691–697, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.022>
- [15] Garbuz M., Klimina L., Samsonov V. Wind driven plantigrade machine capable of moving against the flow. *Appl. Math. Model.*, 2022, vol. 110, pp. 17–27, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.05.035>
- [16] ProjectChrono. An open source multi-physics simulation engine. *Projectchrono.org: веб-сайт*. URL:<https://projectchrono.org/> (дата обращения: 19.06.2023)
- [17] Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. *Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок*. Москва, Изд-во МГУ, 2006. 184 с.
- [18] Marchevsky I.K., Shcheglov G.A. Double layer potential density reconstruction procedure for 3D vortex methods. In: Numerical methods for flows. *Springer*, 2020, pp. 287–295, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30705-9_25

References

- [1] Bungartz H.-J., Schäfer M., ed. Fluid-structure interaction. Modelling, simulation, optimization. *Springer*, 2006. 394 p.
- [2] Morozov V.I., Ponomarev A.T., Rysev O.V. *Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh aeroprugikh system* [Mathematical modeling of complex aeroelastic systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995. 736 p. (In Russ.).
- [3] Co-simulation with Hexagon CAE solutions. *www.cradle-cfd.com: website*. URL: <https://www.cradle-cfd.com/product/msc.html> (accessed: 19.06.2023).
- [4] Solids4foam. *веб-сайт*. URL: <https://www.solids4foam.com/> (accessed: 23.12.2023).
- [5] Marchevsky I., Sokol K., Ryatina E. et al. The VM2D open source code for two-dimensional incompressible flow simulation by using fully Lagrangian vortex particle methods. *Axioms*, 2023, vol. 12, no. 3, art. 248, doi: <https://doi.org/10.3390/axioms12030248>
- [6] Andronov P.R., Dosaev M.Z., Dynnikova G.Y. et al. Modeling of oscillating wind turbine. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, no. 38, no. 4, pp. 383–387, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618809040153>
- [7] Tushev O.N., Shcheglov G.A. Numerical simulation of air launch aeroelasticity with random variation of aerodynamic loading parameters. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 1, pp. 22–33, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2015-1-22-34> (in Russ.).
- [8] Dergachev S.A., Marchevsky I.K., Shcheglov G.A. Flow simulation around 3D bodies by using Lagrangian vortex loops method with boundary condition satisfaction with respect to tangential velocity components. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2019, vol. 94, art. 105374, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105374>
- [9] Marchevskiy I.K., Shcheglov G.A., Dergachev S.A. *VM3D — programmnyy kompleks dlya modelirovaniya prostranstvennykh techeniy neszhimaemoy sredy vikhrevymi metodami* [VM3D — software package for modelling spatial flows of incompressible medium by vortex methods]. Svid. o gos. reg. prog. dlya EVM 2022660838 [Software reg. certificate 2022660838]. Reg. 10.06.2022. (In Russ.).
- [10] Tasora A., Serban R., Mazhar H. et al. Chrono: an open source multi-physics dynamics engine. In: HPCSE 2015. *Springer*, 2015, pp. 19–49, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40361-8_2
- [11] Wei Z., Edge B.L., Dalrymple R.A. et al. Modeling of wave energy converters by GPUSPH and Project Chrono. *Ocean Eng.*, 2019, vol. 183, pp. 332–349, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.029>
- [12] Martínez-Estévez I., Domínguez J.M., Tagliafierro B. et al. Coupling of an SPH-based solver with a multiphysics library. *Comput. Phys. Commun.*, 2023, vol. 283, art. 108581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108581>
- [13] Strekalov S.D., Misharev G.M., Strekalova L.P. et al. *Ustroystvo dlya preobrazovaniya vozobnovlyаемой энергии* [Renewable energy converter]. Patent RU 2293212. *Appl.* 04.08.2005, publ. 10.02.2007. (In Russ.).

- [14] Klimina L., Dosaev M., Selyutskiy Y. Asymptotic analysis of the mathematical model of a wind-powered vehicle. *Appl. Math. Model.*, 2017, vol. 46, pp. 691–697, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.022>
- [15] Garbuz M., Klimina L., Samsonov V. Wind driven plantigrade machine capable of moving against the flow. *Appl. Math. Model.*, 2022, vol. 110, pp. 17–27, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.05.035>
- [16] ProjectChrono. An open source multi-physics simulation engine. *Projectchrono.org: website*. URL: <https://projectchrono.org/> (accessed: 19.06.2023)
- [17] Andronov P.P., Guvepnyuk C.B., Dynnikova G.Ya. *Vikhrevye metody rascheta nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh nagruzok* [Vortex methods of calculation of unsteady hydrodynamic loads]. Moscow, Izd-vo MGU Publ., 2006. 184 p. (In Russ.).
- [18] Marchevsky I.K., Shcheglov G.A. Double layer potential density reconstruction procedure for 3D vortex methods. In: Numerical methods for flows. *Springer*, 2020, pp. 287–295, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30705-9_25

Статья поступила в редакцию 06.07.2023

Информация об авторах

ЩЕГЛОВ Георгий Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru).

ДЕРГАЧЕВ Сергей Александрович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sadergachev@mail.ru).

Information about the authors

SHCHEGLOV Georgii Aleksandrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru).

DERGACHEV Sergey Alexandrovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Lecturer, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sadergachev@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Щеглов Г.А., Дергачев С.А. Численное моделирование динамики движения механизма в потоке несжимаемой среды с использованием метода вихревых петель. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 1, с. 21–30, doi: [10.18698/0536-1044-2024-01-21-30](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2024-01-21-30)

Please cite this article in English as:

Shcheglov G.A., Dergachev S.A. Numerical simulation of the mechanism motion dynamics in the incompressible medium flow using the vortex loop method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 1, pp. 21–30, doi: [10.18698/0536-1044-2024-01-21-30](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2024-01-21-30)