

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАВАЮЩИХ ОРГАНИЗМОВ

С. И. Мартынов, Л. Ю. Ткач

Работа выполнена при поддержке  
гранта РФФИ № 15-41-00077

### 1. Введение

Моделирование плавания организмов в жидкости является актуальной задачей, как для биомеханики, так и различных приложений, с точки зрения конструирования современных технических устройств, использующих в своей работе принципы плавания организмов. Это касается моделирования плавания, как макро, так и микроорганизмов. Причем последнее представляет интерес также и с точки зрения управления внешними полями движением в жидкости деформируемых агрегатов мелких частиц. Примерными задачами практических приложений такого моделирования являются: создание новых типов гидродинамических движителей и гидродинамических насосов, использующих в своей конструкции принципы плавания организмов; создание жидких дисперсных систем, течением которых можно управлять за счет приведения их в движение в результате деформации формы каким-либо внешним воздействием содержащихся в них агрегатов мелких частиц; создание микро-аппаратов, использующих принципы движения микроорганизмов, для обследования сосудов и органов человека.

Моделирование плавания микроорганизмов в жидкости представляет интерес так же для биологии, бактериологии, медицины. Известно достаточно много микроорганизмов, обитающих как в природной среде, так и в пищеварительных, кровеносных, половых каналах человека и животных. Поэтому моделирование их движения позволяет разрабатывать методы воздействия, предотвращающие или затрудняющие их проникновение в организм человека или какую-либо его область.

Имеющиеся в литературе модели плавания макро и микроорганизмов рассматривают деформацию тел, имитирующих реальные движения того или иного организма, с целью получить в результате перемещение тела в заданном направлении. Сложность рассматриваемой задачи заключается в том, что жидкость – организм образуют систему, в которой за счет действия внутренних сил и моментов организма формируется такое течение жидкости, которое приводит сам организм в поступательное движение относительно жидкости. Причем, как во всякой системе, суммы внутренних сил и их моментов должны равняться нулю. Имеющиеся в литературе модели фактически не дают ответа на вопрос, каким же образом деформациями сформировать течение в жидкости вне организма, чтобы возникла движущая сила. Например, известная модель волнообразной деформации тела, имитирующей движение жгутиковых и рыб, в главном приближении дает нулевую силу, действующую в направлении предполагаемого движения организмов [1]. Кроме того, при моделировании необходимо учитывать гидродинамическое взаимодействие частей организма при его движении, что само по себе представляет сложную задачу. Опубликованные в последние годы работы по моделированию плавания организмов [2–5] связаны, главным образом, с практической реализацией движения на основе аналогового принципа и дают качественную картину. Количественная оценка динамики модели микроорганизма дается без учета главных факторов, влияющих на его динамику, в первую очередь это гидродинамическое взаимодействие частей модели.

Авторы предлагают подход к моделированию плавания организмов, учитывающий гидродинамическое взаимодействие его частей. Он заключается в определении течения, формирование которого приводит реальный организм в движение, и моделирование таких относительных перемещений его составных частей, которые и создают это необходимое течение. При этом учитывается гидродинамическое взаимодействие всех частей модели. Ниже приводится

модельные примеры такого подхода на основе полученных ранее результатов по моделированию динамики разного рода агрегатов с учетом гидродинамического взаимодействия.

## 2. Модель

Как показывает анализ движения плавающих организмов [2–5], в большинстве случаев это происходит в результате создания в окружающей жидкости вихревого течения (рис. 1). Такого рода течения образуются при плавании различных организмов и создаются движениями каких-либо частей этого организма.

В качестве модельного примера рассматривается модель плавающего агрегата, состоящего из сферических частиц, соединенных между собой стержнями. Часть частиц моделируют тело организма и на них наложены связи, препятствующие их вращению, а некоторые частицы моделируют двигательный аппарат организма и они могут свободно вращаться вокруг любой оси, проходящей через их центр. К таким частицам приложены моменты, сумма которых равна нулю, что моделирует свойство внутренних моментов системы. Под действием внутренних моментов частицы, моделирующие двигательный аппарат организма, вращаются с угловыми скоростями, что создает вихревое течение в окружающей жидкости, заставляющее всю систему частиц поступательно перемещаться в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой находятся векторы внутренних моментов. Меняя направление приложенных моментов, можно изменять вихревое течение жидкости вокруг системы частиц и тем самым направление перемещения всей системы. При этом учитывается гидродинамическое взаимодействие всех частиц системы с использованием результатов работ [6–8].



Рисунок 1

Ниже представлены результаты по моделированию динамики плавания различных агрегатов в вязкой жидкости за счет действия внутренних моментов структуры.

## 3. Результаты численного моделирования

1. Первый модельный пример. Рассмотрим структуру из пяти сферических частиц, соединенных между собой стержнями (рис. 2). Три частицы А, В и С моделируют тело, а частицы D и E – двигательный аппарат организма. Система частиц помещена в вязкую жидкость. К частицам D и E приложены равные по величине и противоположные по направлению моменты  $M_D$  и  $M_E$ , под действием которых частицы D и E вращаются с угловыми скоростями (направление вращения указано стрелками внутри частиц) и создают вихревое течение в окружающей жидкости аналогичное течению на рис. 1. Динамика агрегата рассматривается в приближение малых чисел Рейнольдса. Расчеты показывают, что в результате созданного вихревого течения вся система перемещается в направлении, указанном стрелками на рисунке. Меняя направление приложенных моментов, можно изменять направление перемещения всей системы. При

расчетах учитывается гидродинамическое взаимодействие всех частиц системы [6–8]. При моделировании динамики агрегата задавались единичные значения радиусов частиц, их плотности и вязкости жидкости. Величина моментов считалась равной 10. Переход к реальным размерам системы и характеристикам жидкости осуществляется согласно работе [8].

Анализ полученных результатов моделирования динамики подобного рода систем частиц показывает, что при заданных моментах внутренних сил изменением числа частиц, моделирующих тело плавающего организма, размеров и геометрии соединения их между собой, увеличением частиц, имитирующих двигательный аппарат организма, можно увеличивать или уменьшать скорость перемещения всей системы.

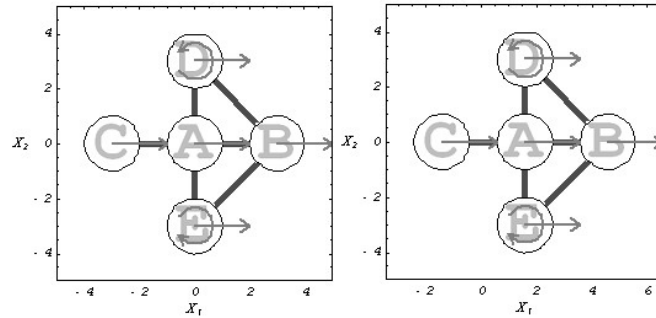


Рисунок 2

2. Вт орой модельный пример. Рассмотрим структуру из шести сферических частиц, соединенных между собой стержнями (рис. 3).

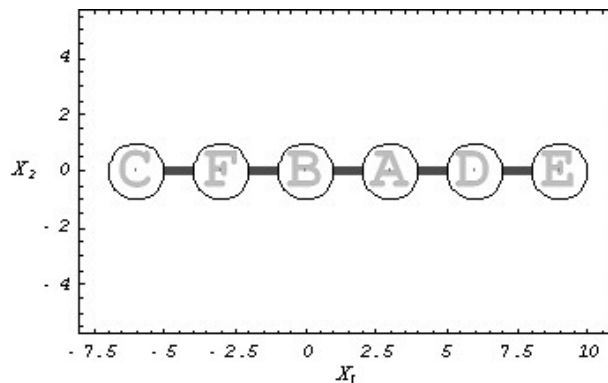


Рисунок 3

К частицам D и E, B и A, C и F, попарно приложены моменты  $M_D$  и  $M_E$ ,  $M_B$  и  $M_A$ ,  $M_C$  и  $M_F$ , соответственно, равные по величине и противоположные по знаку. В результате действия моментов частицы вращаются, создавая вихревое течение в окружающей жидкости. Течение жидкости создает силу, которая деформирует структуру. На рис. 4 приведены результаты численного моделирования при следующих значениях моментов:  $M_D = -M_E = -1$ ,  $M_B = -M_A = -5$ ,  $M_C = -M_F = 2$ .

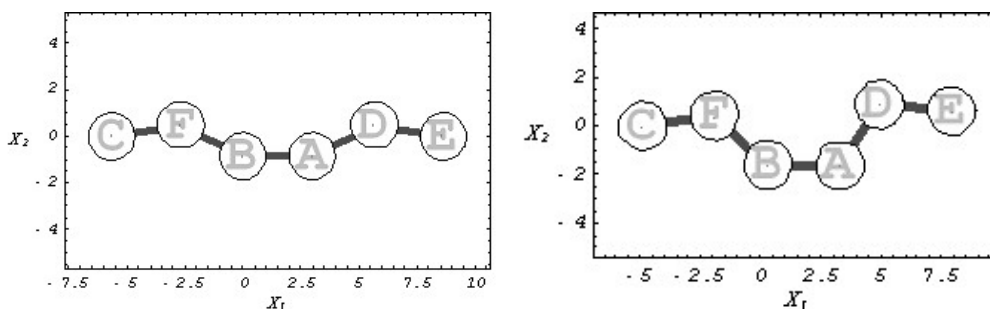


Рисунок 4

В последней конфигурации меняем направление внутренних моментов, действующих на частицы В и А, на противоположные и рассчитываем динамику структуры. На рис. 5 приведены результаты численного моделирования при следующих значениях моментов:

$$M_D = -M_E = -1, M_B = -M_A = 5, M_C = -M_F = 2.$$

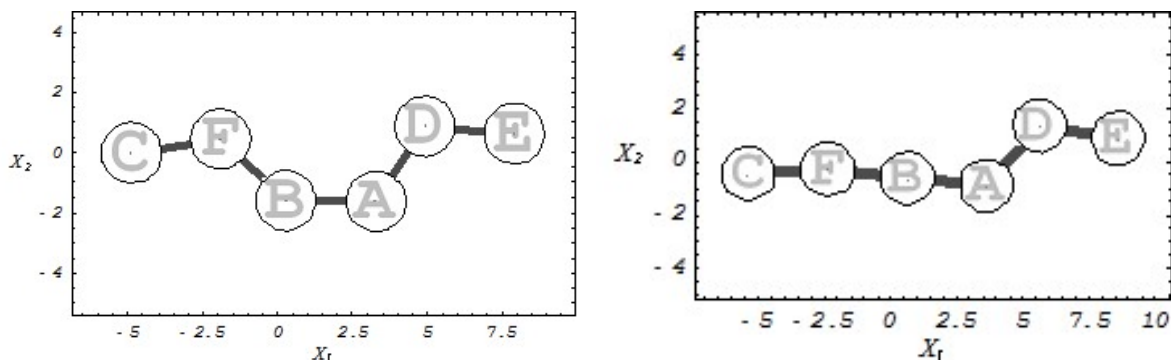


Рисунок 5

В последней конфигурации меняем значения внутренних моментов, действующих на частицы D и E. На рис. 6 приведены результаты численного моделирования при следующих значениях моментов:  $M_D = -M_E = -1, M_B = -M_A = 5, M_C = -M_F = 5$ .

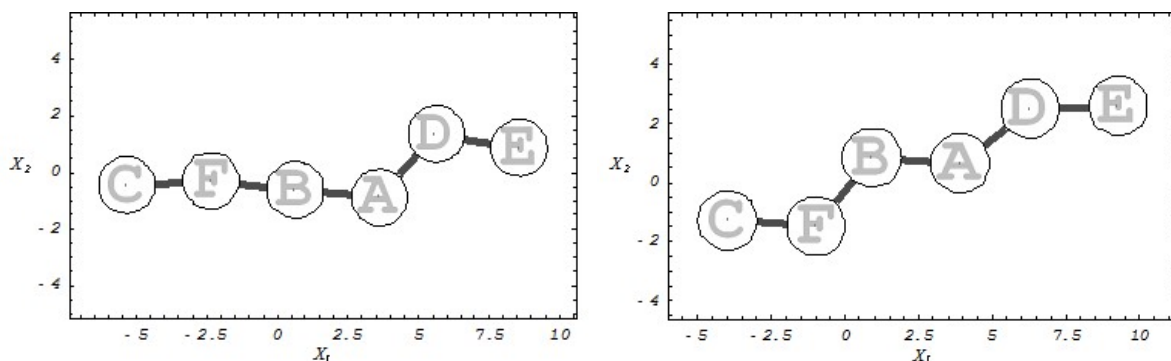


Рисунок 6

В последней конфигурации меняем значения и направления внутренних моментов, действующих на частицы D и E, и направления моментов, действующих на C и F. На рис. 7 приведены результаты численного моделирования при следующих значениях моментов:

$$M_D = -M_E = 1, M_B = -M_A = 5, M_C = -M_F = -2.$$

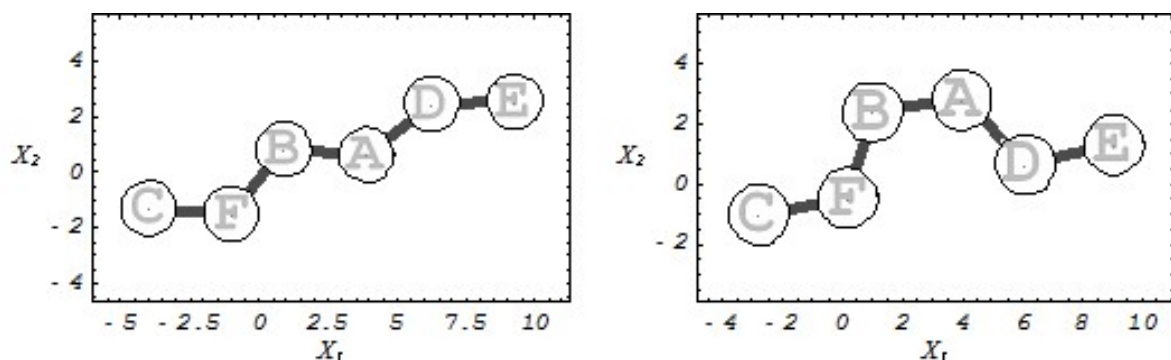


Рисунок 7

В последней конфигурации меняем направление внутренних моментов, действующих на частицы B и A, на противоположные и рассчитываем динамику структуры. На рис. 8 приведены результаты численного моделирования при следующих значениях моментов:

$$M_D = -M_E = 1, M_B = -M_A = -5, M_C = -M_F = -2.$$

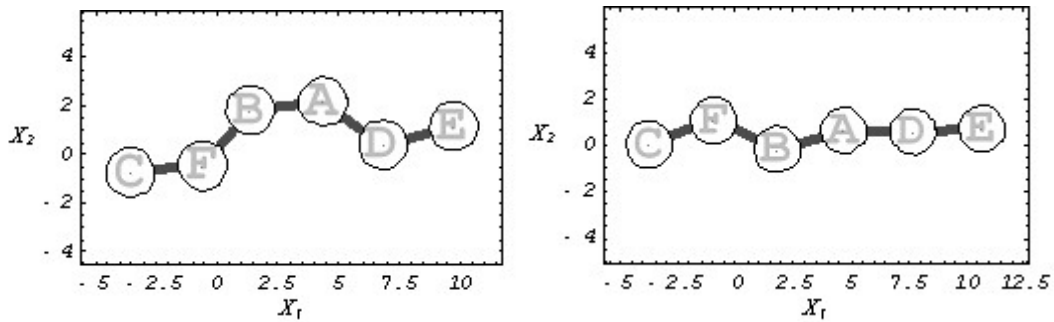


Рисунок 8

В последней конфигурации меняем направление внутренних моментов, действующих на частицы С и F, на противоположные и рассчитываем динамику структуры. На рис. 9 приведены результаты численного моделирования при следующих значениях моментов:

$$M_D = -M_E = -1, M_B = -M_A = -5, M_C = -M_F = -2$$

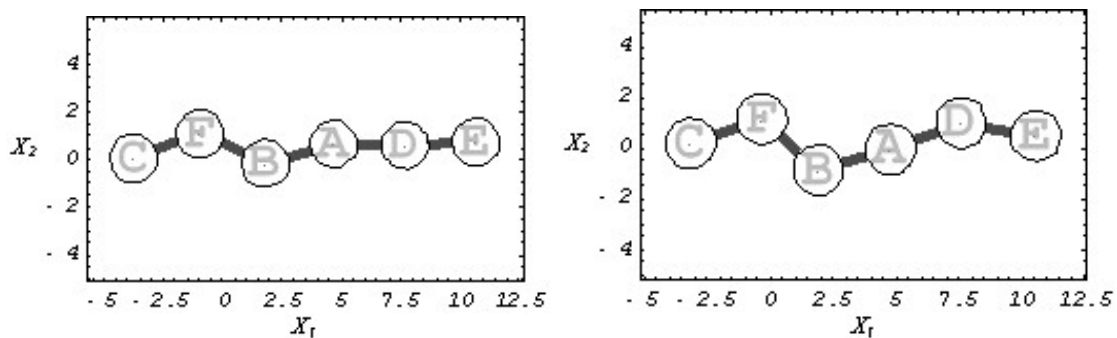


Рисунок 9

Как видно из результатов моделирования, внутренние моменты приводят во вращение частицы, которые создают такое вихревое течение в окружающей жидкости, что появляется сила, действующая со стороны жидкости на систему и смещающая ее вдоль горизонтальной оси. Динамика рассматриваемой системы схожа с динамикой организмов, перемещающихся за счет волнообразного изгибания своего тела.

Полученные результаты дают основание полагать, что предлагаемый подход может служить моделью для описания динамики плавающих организмов.

### Литература

1. Бэтчелор, Дж. Успехи микрогидродинамики [Текст] / Дж. Бэтчелор // Теоретическая и прикладная механика : труды XIV Междун. Конгресса IUTAM. – 1979. – С. 136–187.
2. Lighthill, J. On the squirming motion of nearly spherical deformable bodies through liquids at very small Reynolds number // Commun. Pure. Appl. Maths. – 1952. – Vol. 5. – P. 109–118.
3. Lentink D., Muijres, F. T., Donker-Duyvis, F. J. and van Leeuwen J. L. Vortex-wake interactions of a flapping foil that models animal swimming and flight. – 2008. – J. Exp. Biol. – Vol. 211. – P. 267–273.
4. Iima, M. A two-dimensional aerodynamic model of freely flying insects // J. Theor. Biol. – 2007. – Vol. 247. – P. 657–671.
5. Lentin, D. Exploring the bio fluid dynamics of swimming and flight. PhD thesis, Experimental Zoology Group, Wageningen University. – 2008. – 185 p.
6. Мартынов, С. И. Гидродинамическое взаимодействие частиц [Текст] / С. И. Мартынов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1998. – № 2. – С. 112–119.
7. Баранов, В. Е. Влияние гидродинамического взаимодействия на скорость осаждения большого числа частиц в вязкой жидкости [Текст] / В. Е. Баранов, С. И. Мартынов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2004. – № 1. – С. 152–164.

8. Мартынов, С. И. Моделирование динамики агрегатов частиц в вязкой жидкости [Текст] / С. И. Мартынов, Л. Ю. Ткач // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015. – Т. 55, № 2. – С. 109–118.

9. Gulyaev, I. P. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface // Technical Physics Letters. – 2009. – Т. 35, № 10. – P. 885–888. – DOI: 10.1134/S1063785009100034.

10. Konovalova N. I., Martynov S. I. Simulation of particle dynamics in a rapidly varying viscous flow // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2012. – Т. 52, № 12. – С. 1679–1690. – DOI: 10.1134/S0965542512120093.

11. Baranov V. E., Martynov S. I. Simulation of particle dynamics in a viscous fluid near a plane wall // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2010. – Т. 50, № 9. – С. 1588–1604. – DOI: 10.1134/S0965542510090101.