УДК 539.4:620.2+519.621.64

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ МЯГКОГО РОБОТА АМЕБОПОДОБНОГО ТИПА

член-корр. НАН Беларуси [1] **Чижик С.А.,** д-р инж. [2] **К. Циммерманн,** асп. [3] **Чигарев В.А.**

[1] *Президиум национальная академия наук Беларуси, Минск*
[2] *Технический университет Ильменау, Германия*
[3] *Белорусский национальный технический университет, Минск*

Введение. Наблюдения за перемещением амеб показывает, что геометрия их внешней оболочки может изменяться существенным образом от почти эллипсоидальной до появления выростов, сопоставимых с характерным размером (рисунок 1).

Рисунок 1 – Одноклеточный организм – амёба, с хорошо выраженными ложноножками

Выросты напоминают по форме течения, по форме близкие к «жидким пальцам», характерным для структур появляющихся при вытеснении нефти водой [1]. При этом во внутренней жидкой среде наблюдаются хорошо выраженные течения, механизм которых до конца не выяснен. Характерно, что измененная форма фиксируется и сохраняется достаточно длительное время, что может свидетельствовать о том, что возникает некоторая внутренняя устойчивая структура трансформированного из начального эллипсоида. Большие деформации внешней оболочки наблюдаются также при поглощении других объектов.

Рассмотрим модель деформируемого тела с изменяемой геометрией, а также переменной массой и составом [2, 3]. Поступательное перемещение центра масс за счет внутренних течений можно создать, если изменяется масса. Обозначим $\overline{V}_C$ скорость центра масс, тогда

$$M\frac{d\overline{V}_C}{dt}=\left(\overline{u}-\overline{V}_C\right)\frac{dM}{dt}, \tag{1}$$

где u – абсолютная средняя скорость переменной части системы, которая удовлетворяет уравнению

$$\overline{u}\Delta M = M^{+}\overline{V}^{+} - M^{-}\overline{V}^{-}, \tag{2}$$

где M^{+} – масса, $\overline{V}^{+}$ – скорость центра масс притекающих в систему материальных точек, M^{-} – масса, $\overline{V}^{-}$ – скорость центра масс точек вытекающих из системы.

Дополнительная сила, возникающая за счет изменения центра масс равна

$$\overline{F}^{+}=\overline{u}\frac{dM}{dt}. \tag{3}$$

Таким образом, из уравнений (1), (2), (3) следует, что дополнительная сила может возникать только в случаях $\overline{u}\neq\overline{V}_C$, $\dfrac{dM}{dt}\neq 0$. Под действием силы F^{+} тело может начать двигаться из состояния покоя.

В случае, если $\overline{u}-\overline{V}_C=const=\overline{V}$ направлена противоположно скорости движения центра масс, то

$$V_C=\ln\frac{M_0}{M}+V_{OC}, \tag{4}$$

где M_O – начальное значение массы, V_{OC} – начальное значение модуля скорости центра масс.

Из (4) следует, что конечная скорость перемещения центра масс модели не зависит от режима изменения массы.

Модель тела с перфорированными псевдоподии (ложноножками). Искусственная амеба перемещается в поле тяжести Земли в жидкости, оказывающей сопротивление перемещению, что в уравнении (1) должно учитываться с помощью дополнительных членов

$$M\frac{d\overline{V}_C}{dt}=\overline{F}+\left(\overline{u}-\overline{V}_C\right)\frac{dM}{dt},\qquad \overline{F}=\overline{F}_g+\overline{F}_t, \tag{5}$$

где $F_g=ma$ – сила тяжести, $F_t=-\alpha\overline{V}_C$ – сила сопротивления среды.

Если движение происходит по поверхности, то необходимо учесть силу терния и наложить условия связи.

Рассмотрим механизм локальных изменений геометрии оболочки под воздействием внутренних течений. Наблюдения показывают, что поток внутренней жидкости направляется на мембрану, которая под его действием начинает деформироваться образуя вырост в виде трубки.

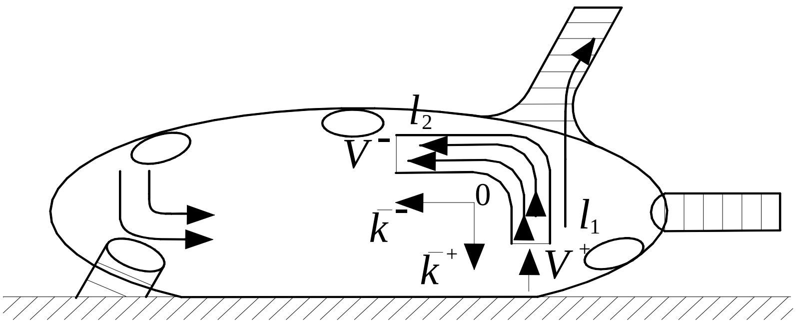

Рисунок 2 – Схема перетекания жидкости из нижней псевдоподии в верхнюю

Оценим усилие локального воздействия на стенку оболочки. Масса, заполняющая оболочку остается постоянной, но состав меняется. Выделим локальную трубку тока жидкости в виде прямого угла. Идет отток жидкости из нижней псевдоподии и частично в объем тела. Псевдоподии армированы пружинами с переменной жидкостью.

Обозначим $\overline{k}^+$ – направляющий вектор трубки тока, направленной к стенке, $\overline{k}^-$ – направляющий вектор линий тока трубки жидкости оттока.

Обозначим через $\rho_{(i)}$ – плотность внутренней жидкости. Тогда имеем

$$\frac{dM^+}{dt}=\frac{dM^-}{dt}=S\rho_{(i)}\overline{u}\,. \tag{6}$$

$$\overline{V}^+=-u\overline{k}^+ +V_C\overline{k}^-,\ \overline{V}^-=u\overline{k}^- +V_C\overline{k}^-. \tag{7}$$

Здесь $\overline{V}_C$ скорость смещения трубки тока вследствие деформируемости стенки, S – эффективное сечение трубки тока. Считаем, что стенка не оказывает сопротивление.

Сила действия потока жидкости на оболочку без учета сопротивления будет равна

$$\overline{F}_m=-S\rho u^2\left(\overline{k}^+ +\overline{k}^-\right). \tag{8}$$

Положим, что движение вдоль $\overline{k}^+$ не происходит вследствие силы тяжести, тогда смещение оболочки имеет место только вдоль $\overline{k}^-$, а уравнение движения центра масс трубки тока описывается уравнением

$$M_{тр}\frac{dV_C}{dt}=-S\rho_{(i)}u^2,\quad M_{тр}=\rho_{(i)}S\cdot 2l, \tag{9}$$

где $l=l_1+l_2$ длина трубки тока.

Из (9) следует, что перемещение центра масс имеет равноускоренный характер. Если учитывать сопротивление стенки и внешней жидкости, в уравнение (9) добавляем члены силы сопротивления внешней среды

$$M_{тр}\frac{dV_C}{dt}=-S\rho u^2+F_{сопр}\,. \tag{10}$$

Таким образом, если внутренняя масса остается практически неизменной, то поступательное перемещение центра масс возможно осуществить за счет изменения геометрии масс. Изменение геометрии масс для фигуры в целом можно осуществить за счет региональных перемещений центров масс, которые приведут к глобальному смещению центра масс системы. Если в некоторой части внутреннего объема создать локальное течение в направлении оболочки такое, что кинетический момент остается неизменным, тогда полагая в уравнении для кинематического момента $\overline{K}$

$$\frac{d\overline{K}}{dt} = \frac{d\tilde{\overline{K}}}{dt} + \overline{M}_{(i)}, \tag{11}$$

где $\tilde{K}$ – кинетический момент в подвижной системе координат объема постоянного состава.

$$\overline{M}_{(i)} = \overline{M}^{+} - \overline{M}^{-},\ \overline{M}^{+} = \frac{dK^{+}}{dt},\ \overline{M}^{-} = \frac{dK^{-}}{dt}. \tag{12}$$

Полагая $d\overline{K}/dt = 0$ (движение без переползания), получим

$$\overline{M}_{об} = \overline{M}_{об} + \overline{M}_{(i)}, \tag{13}$$

где $\overline{M}_{об}$ – главный вектор гидродинамических сил действующих на оболочку, $\overline{M}_{об}$ – момент массовых сил, $\overline{M}_{(i)}$ – момент сил за счет изменения состава и массы.

Аппроксимируем жидкое тело, заключенное в оболочку системой материальных точек A_i (рисунок 3).

Рассмотрим плоское движение в плоскости *Oxy*, в которой перемещается центр масс *C*.

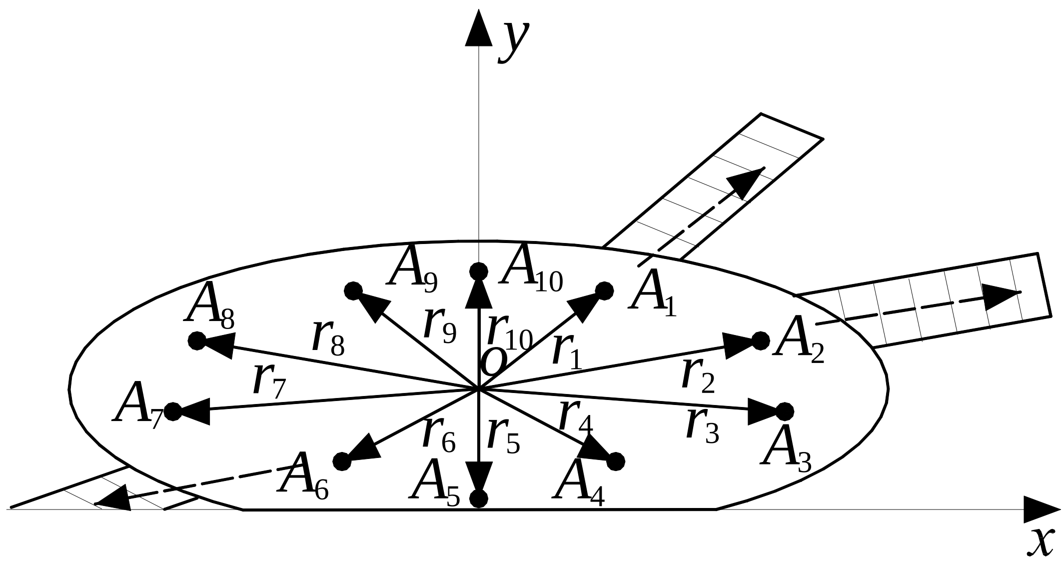

Рисунок 3 – Аппроксимируемое жидкое тело с внешней оболочкой

В начальный момент времени в точках A_i находятся массы m_i^0, которые равны между собой. Движение, при котором кинетический момент не изменяется

$$\frac{d\overline{K}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\sum_i r_i^2 m_i\right) = 0 \tag{14}$$

можно реализовать, если считать r_i и m_i функциями времени, тогда из (14) следует

$$\frac{dm_i}{dt} = -2m_i\overline{r}_i\frac{d\overline{r}_i}{dt}. \tag{15}$$

Введем линию тока жидкости, вдоль которой перемещаются материальные точки, вместо параметра времени *t* будем использовать *s*-расстояние вдоль линии тока, тогда (15) можно записать в виде

$$\frac{dm_i}{ds} = -2m_i\overline{r}_i\frac{d\overline{r}_i}{ds}. \tag{16}$$

Рисунок 4 - «Soft Robot»-гофрированный мягкий робот

Пусть линия тока направлена вдоль $\bar{r}_1$ и точка A_1 перемещается вдоль луча. Так как $d\bar{r}_i / ds = \bar{\tau}_i$ – касательный вектор к *i*-той линии тока, то $\bar{r}_i \cdot \bar{\tau}_i = |r_i| \cos \alpha_i$, где α_i угол между векторами $\bar{r}_i$ и $\bar{\tau}_i$. Таким образом, рост длины луча скелета, связанных в точке A_i ведет к уменьшению массы (плотности) в этом направлении за счет распределения ее в выросте. Этим можно объяснить сходство выростов при движении амебы в среде с течением типа жидких пальцев.

Практическая реализация предложенной модели может быть осуществлена с помощью мягкой оболочки с выростами, имеющими вид гофрированных шлангов, которые под действием жидкодинамических сил и гибкого скелета могут вытягиваться и заполняться внутренней жидкостью или газом (рисунок 4).

Вывод. Полученная математическая модель движения амёбоподобного робота может быть применена к решению задач движения тел с изменяемой геометрией в различных средах, а так же при разработке мягкотелых роботов или механизмов основанных на принципах внутреннего движения масс.

РЕЗЮМЕ

Рассмотрены основные гипотезы движения амёб, созданы математические модели расчёта жидкостных механизмов для осуществления двигательных функций гофрированных мягких роботов. Приведён механизм движения жидких масс в мягкой оболочке. Полученная математическая модель движения амёбоподобного робота может быть применена к решению задач движения тел с изменяемой геометрией в различных средах, а так же при разработке мягкотелых роботов или механизмов основанных на принципах внутреннего движения масс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нитман Н., Даккор Ж., Стенли Х. Когда вязкие «пальцы» имеют фрактальную размерность? «Фракталы в физике» Международный семинар по фракталам в физике (МЦТФ, Италия. 9-12. 07.1985). М.: Мир, 1988. с. 266-281.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л. Курс теоретической механики. М.: Лань, 1988. 728 с.
3. Лайтхилл Дж. Гидромеханика движения водных животных. Сб. Механика. Новое в зарубежной науке, 1972, №1 (131). С. 80-109.

SUMMARY

Have carried out the analysis of mathematical models of amoebalike movings in heterogeneous environments by robots with a soft external cover. Have offered variants of parameters moving calculation of robots with a soft external cover. Models based on principle of Kenigov's system from two co-ordinate systems, and a method of small parameter at movement calculations. Some assumptions, allowing to simplify model of processes proceeding in a robot body are accepted. Processes of an overflowing of internal weights in a body of an amoeba for the purpose of the movement task are considered.

Поступила в редакцию 21.05.2013