



УДК 531/534: [57+61]

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ЛОКОМОЦИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**М.А. Марценюк, С.С. Сыпачев**

Кафедра компьютерных систем и телекоммуникаций Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: mrcn@psu.ru, syrachev\_s\_s@mail.ru

**Аннотация.** Биологические объекты осуществляют движения в пространстве (локомоции) за счет изменения формы своего тела. Во многих опубликованных работах приведены детальные исследования кинематики локомоций. Однако сама связь между деформациями тела и мерой смещения объекта в пространстве в большинстве работ не рассматривается. В данной статье исследована модель поступательного движения самодформирующихся тел, в рамках которой изменение формы тела связывается с его смещением в пространстве (локомоторная связь). Для количественного учета сил трения предложена и реализована в эксперименте модель с управлением массой тела путем присоединения известной массы к определенной его точке. Локомоторная связь получена на основе закона сохранения импульса в виде дифференциальной формы Пфаффа. Она была подвергнута проверке на экспериментальной модели самодформирующегося тела. Для уменьшения помех, связанных с трением, исследуемое тело было помещено на воздушную дорожку (жесткий профиль с множеством отверстий, служащих для создания воздушной подушки). Поступательные локомоции реализованы за счет изменения формы тела и присоединения к нему дополнительной массы таким образом, чтобы это не влияло на положение системы. Управление осуществлялось с помощью программируемого микроконтроллера. Это позволило изменять режимы работы и задавать различные кривые в пространстве параметров. Для определения координат точек тела на нем были размещены контрастные метки, положение которых фиксировалось с помощью скоростной фотосъемки и вычислялось с помощью методов компьютерного зрения. После этого идентифицировались калибровочные потенциалы локомоторной связи. Показано хорошее соответствие теоретической модели результатам эксперимента.

**Ключевые слова:** локомоторная связь, присоединенная масса, поступательное самодвижение, модель поступательного движения, локомоторный цикл, локомоции, скоростная фотосъемка.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день создано большое число различных моделей самодвижения, возникающего за счет изменения их формы и контакта с внешней средой (ходьба, ползание, плавание и т.п.), как естественных (биологических), так и искусственных объектов. Однако физическое описание этих процессов до конца не развито.

Так, например, в обзорной статье Смолянинова [5] собран большой экспериментальный материал и дано описание множества локомоторных циклов,

---

© Марценюк М.А., Сыпачев С.С., 2014

Марценюк Михаил Андреевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и телекоммуникаций, Пермь

Сыпачев Степан Сергеевич, аспирант кафедры компьютерных систем и телекоммуникаций, Пермь

в частности поступательного движения насекомых, пресмыкающихся и ряда животных, а также ходьбы человека; представлены стратегия и различные методы исследования локомоций (следовые дорожки, нотограммы и пр.). В задаче кинематического управления и описания локомоторных синергий автор предлагает использовать геохронометрический подход, который затем связывает с релятивистской кинематикой. Однако модель поступательного движения, которая позволила бы связать изменение формы тела с его перемещением в пространстве (модель локомоторной связи), в работе не представлена. Как следствие, в исследовании отсутствуют экспериментальные данные или количественные оценки движения.

В работе американских авторов [13] также отсутствует физическая модель поступательного движения, но представлена натурная модель движения в жидкости амебоподобного тела. В работах [3, 10, 11] рассмотрены модели плавания простейших организмов, таких как амебы, водоросли и бактерии. Из-за малого размера (порядка единиц микрометров) гидродинамика исследуемых объектов может рассматриваться без учета инерционных эффектов (приближение Стокса). В этих работах нет описания поступательного движения типа ходьбы, но локомоторные циклы плавания, которые рассмотрели авторы, переосмыслены в контексте калибровочной теории.

Калибровочная теория впервые была применена для интерпретации локомоций в работах Вильчека и Шапиро [11, 12], где рассмотрена задача о плавательных локомоциях деформируемых тел. Для этой цели авторы построили калибровочную структуру над пространством форм, которые может принимать тело (расслоенное пространство). В качестве примера рассмотрен объект с нулевым угловым моментом, который за счет изменения формы меняет ориентацию в пространстве. Показано, что использование калибровочной теории позволяет разрешить проблему математического описания тела, которое непрерывно изменяет свою форму. Тем не менее в работах этих авторов описаны только вращательное движение и плавание, не уделено внимания экспериментальной части и прикладным аспектам использования теории.

В обзорной статье [7] представлен комплексный подход к описанию локомоций поворота (типа задачи о падении кота, который всегда приземляется на лапы). Известно, что момент импульса системы не может измениться под воздействием внутренних сил. Однако это не противоречит тому, что замкнутая система связанных тел может поменять свою *ориентацию* в пространстве, модифицируя свою форму, что приводит к изменению момента инерции. Это дает возможность использовать наглядные геометрические представления о расслоенном пространстве при интерпретации наблюдаемых явлений.

Как видно из представленного выше краткого обзора, биомеханика постуральных локомоций человека и животных развита недостаточно. Основная трудность состоит в том, что для решения этой задачи необходимо тем или иным способом учесть взаимодействие рассматриваемой системы с внешней средой, так как в замкнутой системе имеет место закон сохранения импульса  $P$ . Если в начальный момент времени  $P = 0$ , то положение центра инерции системы с течением времени не может измениться. Целью настоящей работы является построение модели поступательных локомоций типа ходьбы и ее экспериментальное подтверждение. При этом взаимодействие со средой осуществляется за счет обмена массой, что позволяет избежать трудностей, связанных с моделированием силы трения. В рамках представленной модели удастся связать пространственное смещение тела  $dx_i$  (здесь индекс  $i$  нумерует декартовы координаты радиуса-вектора) с изменением параметров его формы  $dq_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ):

$$dx_i = \sum_{j=1}^m A_{i,j}(x, q) dq_j, \quad (1)$$

где  $A_{i,j}(x, q)$  – калибровочный потенциал. Как было отмечено, в силу закона сохранения импульса поступательные смещения возможны только для незамкнутой системы. Поскольку величину трения при контакте с «землей» сложно проконтролировать на опыте и описать в рамках простой теоретической модели, авторы предположили, что тело может обмениваться с окружением веществом, временно присоединяя к определенной своей точке некоторую массу (модель присоединенной массы). При этом предполагается, что масса присоединяется «адиабатически», т.е. имеет скорость, практически равную нулю, и само тело покоится в лабораторной системе отсчета. Отметим, что по сути дела роль силы трения как раз и сводится к тому, что она дает возможность ходоку присоединить к себе («приклеить») массу тела, на которое он опирается, делая шаг.

Также следует оговорить, что здесь мы полностью игнорируем все инерционные эффекты. Другими словами, предполагается, что изменения формы происходят медленно, без ускорения, т.е. в этом смысле рассматривается скорее ползание, чем ходьба или бег, где так или иначе могут проявляться инерционные эффекты. В этом смысле можно также сказать, используя термины калибровочной теории, что построенная в работе модель относится к тому же типу, что и теория адиабатической фазы Берри, а не, например, фазы Ааронова–Анандана (см. подробнее [1]).

Для экспериментальной проверки теории была создана действующая модель системы, которая совершает поступательное движение за счет изменения своей формы и присоединения масс. Система представляет собой две платформы, взвешенные на воздушной подушке, что позволило значительно снизить влияние сил трения, локомоторный цикл управления задается программируемым микроконтроллером. Электронная схема и источник энергии находятся на движущихся платформах. Движения присоединяемой или удаляемой масс происходят в направлении, перпендикулярном направлению движения модели. Величина массы выбиралась такой, что ее влияние на возможное изменение трения было незначительным. Форма тела задавалась с помощью упругой связи, приводимой в действие сервоприводом. Положение частей объекта относительно лабораторной системы отсчета фиксировалось с помощью скоростной фотокамеры по меткам, размещенным на поверхности тела. Точность измерения координат была равна около 0,5 мм. Компьютерная обработка фотографий позволила идентифицировать происходящие изменения формы тела и его смещения в лабораторной системе отсчета.

### МОДЕЛЬ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ЛОКОМОЦИЙ

Для установления связи изменения формы тела с его смещением в пространстве (локомоторная связь) будем использовать следующую модель движущегося тела. Рассмотрим систему  $S$  связанных между собой  $n$  твердых тел  $T_a$ , где  $a = 1, 2, \dots, n$ . Система может изменять свою форму за счет изменения длин, ориентации связей  $q_{a,b}$  и ориентации самих тел  $T_a$ . В процессе движения тела могут изменять свои массы  $m_a$  или, что то же самое, присоединять к себе некоторые массы  $\Delta m_a$  из источника, находящегося вне системы. Как было пояснено во введении, предполагается, что движение тел и присоединение масс происходит достаточно медленно (адиабатически), чтобы можно было пренебречь инерционными эффектами. Кроме того, предполагается, что направление движения присоединяемых или удаляемых масс ортогонально

направлению поступательного перемещения тела. В теоретической модели авторы полностью пренебрегают трением.

Поскольку система  $S$  изменяет свою форму и массу, возникает проблема выбора системы отсчета, с помощью которой мы могли бы указать положение системы  $S$  относительно лабораторной системы отсчета. Будем считать, что система  $S$  совершает локомоторные циклы (как это делает ходок), периодически возвращаясь к некоторой начальной форме и к начальному распределению масс.

Предположим, что в начальном состоянии ( $t=0$ ) система имела некоторую форму  $q(0)=q_0$  и распределение масс  $m(0)=m_0$  (для краткости здесь опущены индексы, нумерующие связи и массы). В процессе движения форма тела меняется и описывает траекторию в пространстве  $(q, m)$ , которая выражается функциями  $q(t)$  и  $m(t)$ . Далее мы называем пространство  $(q, m)$  фазовым, а заданную параметрически траекторию  $(q(t), m(t))$  – фазовой траекторией. Будем считать, что в момент завершения цикла  $t=\tau$  система возвращается в начальную фазовую точку, в которой она находилась в момент  $t=0$ :  $q(t)=q_0$ ,  $m(t)=m_0$ . Для простоты считаем фазовую траекторию замкнутой линией, не имеющей самопересечений. Очевидно, что в этом случае смещение  $\Delta x$ , совершенное системой за период  $\tau$ , не будет зависеть от выбора системы отсчета, так как форма тела в моменты  $t=0$  и  $t=\tau$  одна и та же, и поэтому задача сведется к определению относительного положения в пространстве твердого тела в два разных момента времени.

Таким образом, будем определять положение системы  $S$  только в моменты начала и окончания циклов, мы можем связать систему отсчета с любым из тел  $T_a$  системы  $S$  и при этом будем получать однозначный результат наблюдения смещения тела.

Далее ограничимся случаем одномерного поступательного движения. Рассмотрим систему из двух тел  $T_1, T_2$ , имеющих массы  $m_1, m_2$ , связанных между собой невесомым стержнем, который может изменять свою длину  $l$  (рис. 1). Предположим, что в начальный момент времени система покоится и импульс  $P$  всей системы равен нулю:

$$P = \sum m_a v_a = 0.$$

Как было пояснено выше, мы не рассматриваем случай реактивного движения, которое может возникнуть при ускоренном изменении массы одного или нескольких тел, и считаем, что в то время, пока к телу добавляется (или отнимается) масса, оно находится в состоянии покоя, а само изменение массы и длины связи происходит бесконечно медленно. При этих условиях изменение массы отдельных тел не будет приводить к изменению импульса системы, а будет изменяться только положение ее центра инерции.

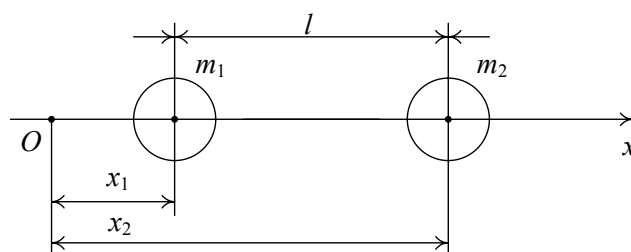


Рис. 1. Модель поступательного движения тела с изменяемой массой

Покажем теперь, как такая система может перемещаться в пространстве. Исходим из закона сохранения импульса системы в лабораторной системе отсчета, который авторы представили в виде

$$m_1 \frac{dx_1}{dt} + m_2 \frac{dx_2}{dt} = 0. \quad (2)$$

Движущуюся систему отсчета привяжем к первому телу, т.е. будем считать, что его координата  $x_1 = x$  относительно лабораторной системы отсчета задает положение всей системы  $S$  на оси  $x$ . Как видно из рис. 1, координату второго тела  $x_2$  можно выразить через координату  $x$  и внутренний параметр системы – управляемую длину связи  $l$

$$x_2 = x_1 + l = x + l.$$

Тогда из уравнения (2) получаем

$$m_1 \dot{x} + m_2 (\dot{x} + \dot{l}) = 0.$$

Отсюда следует, что

$$(m_1 + m_2) dx = -m_2 dl,$$

или окончательно находим форму Пфаффа

$$dx = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} dl, \quad (3)$$

которая связывает между собой смещение системы  $dx$  в лабораторной системе отсчета и изменение его внутреннего параметра  $dl$  и представляет собой искомую локомоторную связь данной задачи.

В общем случае для системы с двумя внутренними степенями свободы  $l$  и  $m$  можно получить вместо выражения (3) соотношение вида

$$dx = A_l dl + A_m dm, \quad (4)$$

где  $(A_l, A_m)$  – калибровочные потенциалы. В данном случае, как можно видеть из (3),

$$A_l = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad A_m = 0.$$

Перепишем форму Пфаффа (3) в виде

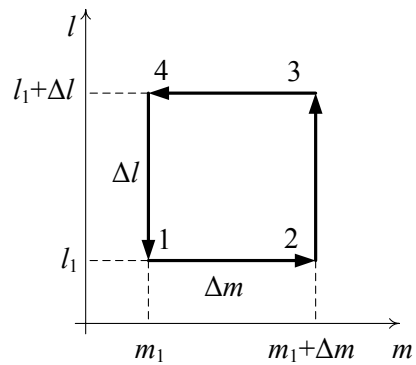
$$dx = -\mu dl, \quad (5)$$

где введено обозначение

$$\mu = \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Допустим, что система изменяет свою форму и массу, проходя некоторый путь по замкнутой траектории  $\Gamma$  в фазовом пространстве  $(l, m)$ . Благодаря локомоторной связи (4) между изменениями параметров  $dl, dm$  и смещением  $dx$  можно вычислить полное смещение тела, когда оно проходит путь  $\Gamma$  в виде интеграла по замкнутой траектории

$$\Delta x_{12} = \int_{\Gamma} (A_l(l, m) dl + A_m(l, m) dm). \quad (6)$$


 Рис. 2. Замкнутый цикл в фазовом пространстве  $(l, m)$ 

Рассмотрим конкретный пример замкнутой траектории в пространстве  $(l, m)$  (рис. 2). Напомним, что движущаяся система отсчета связана с телом  $I$ .

Начальная точка  $I$  имеет координаты  $l_1, m_1$ . Адиабатическое увеличение  $m_1$  на величину  $\Delta m$  при неизменном значении  $l = l_1$  приведет к смещению фазовой точки в положение 2, причем ее координаты будут равны  $(l_1, m_1 + \Delta m)$ . На этом участке траектории смещение тел  $I$  и  $2$  не произойдет,  $\Delta x_{12} = 0$ . Калибровочный потенциал  $A_l$  в точке 2 примет значение

$$A_{l2} = -\frac{m_2}{m_1 + m_2 + \Delta m}.$$

Растяжение связи  $l$  на величину  $\Delta l$  приведет к перемещению фазовой точки в положение 3. В соответствии с законом сохранения импульса положение центра масс не изменится. Согласно формуле (6) тело  $I$  сместится на величину  $\Delta x_{23} = A_{l2} \Delta l$ . Уменьшение массы первого тела до исходного значения на величину  $\Delta m$  приведет к перемещению фазовой точки в положение 4. При этом тело  $I$  останется на месте,  $\Delta x_{34} = 0$ , а калибровочный потенциал примет значение

$$A_{l1} = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Наконец приведем длину связи  $l$  в исходное состояние, уменьшив ее на величину  $\Delta l$ . Траектория на рис. 2 замкнется. При этом тело  $I$  сместится на величину  $\Delta x_{41} = -A_{l1} \Delta l$ .

В результате прохождения полного цикла  $1-2-3-4-1$  в фазовом пространстве смещение системы окажется равным  $\Delta x = \Delta x_{23} + \Delta x_{41} = (A_{l2} - A_{l1}) \Delta l$  или после подстановки значений потенциалов

$$\Delta x = \left( -\frac{m_2}{m_1 + m_2 + \Delta m} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \Delta l = \frac{m_2}{(m_1 + m_2 + \Delta m)(m_1 + m_2)} \Delta m \Delta l. \quad (7)$$

Для ясности также подробно исследуем движение тел  $I-2$  в процессе рассмотренного локомоторного цикла, не используя понятия калибровочной теории. Введем удобные для дальнейшего исследования параметры

$$X = \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2, \quad l = x_2 - x_1, \quad (8)$$

где

$$\mu_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad \mu_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}. \quad (9)$$

Здесь  $X$  – координата центра инерции системы, а  $l$  – расстояние между телами 1–2. Координаты  $x_1, x_2$  выражаются через введенные параметры следующим образом:

$$x_1 = X - \mu_2 l, \quad x_2 = X + \mu_1 l. \quad (10)$$

1. В начальном положении (рис. 3, а) расстояние между телами 1, 2 равно  $l$ .

2. Далее, предполагая тела 1–2 покоящимися, присоединим к телу 1 массу  $\Delta m$ , так что его масса станет равной  $m_1 + \Delta m$  (как уже было указано, скорость присоединяемой массы считаем равной нулю). При этом координаты  $x_1$  и  $x_2$  остаются прежними и определяются формулами (10), однако положение центра масс системы изменится и будет равно  $X'$  (рис. 3, б), где

$$X' = \mu'_1 x_1 + \mu'_2 x_2; \quad \mu'_1 = \frac{m_1 + \Delta m}{m_1 + m_2 + \Delta m}, \quad \mu'_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2 + \Delta m}. \quad (11)$$

Координаты  $x_1$  и  $x_2$  можно также представить в следующем виде:

$$x_1 = X' - \mu'_2 l, \quad x_2 = X' + \mu'_1 l. \quad (12)$$

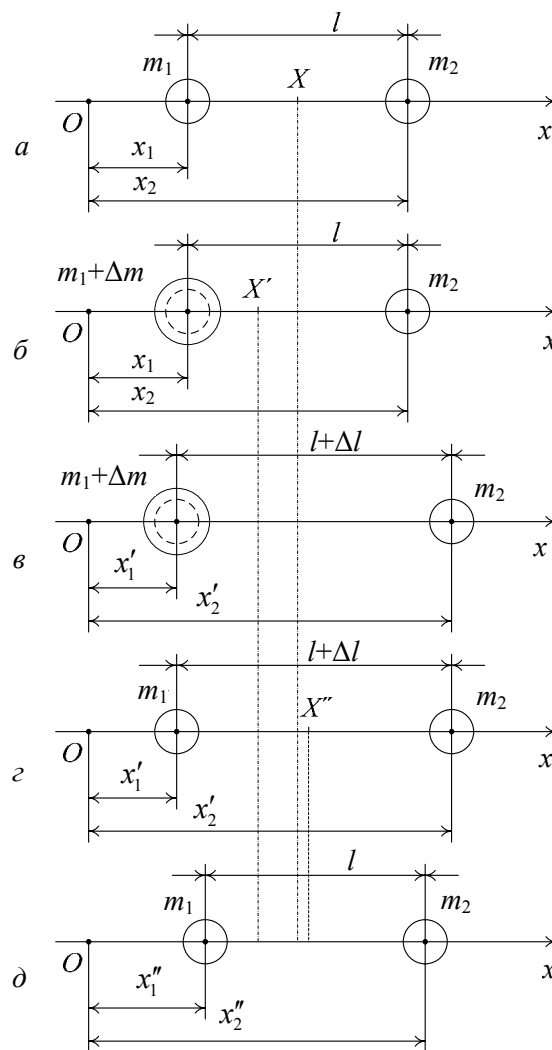


Рис. 3. Локомоторный цикл, разбитый по фазам

3. Переход в следующее положение (рис. 3, в) происходит путем изменения расстояния  $l$  на величину  $\Delta l$ , т.е. новое расстояние  $l-2$  будет равно  $l + \Delta l$ . Из закона сохранения импульса следует, что центр масс не сместится и будет находиться в том же положении  $X'$ , а координаты тел  $l-2$  будут иметь следующие значения:

$$x_1' = X' - \mu_2'(l + \Delta l) = x_1 - \mu_2'\Delta l, \quad x_2' = X' + \mu_1'(l + \Delta l) = x_2 + \mu_1'\Delta l, \quad (13)$$

где были учтены равенства (12).

4. Затем уменьшим (также адиабатически) массу тела  $l$  до начальной величины  $m_1$  (см. рис. 3, в). В результате центр инерции системы будет иметь координату  $X''$

$$X'' = \mu_1 x_1' + \mu_2 x_2', \quad (14)$$

а координаты тел  $l-2$  останутся равными  $x_1'$  и  $x_2'$ .

5. На последнем шаге уменьшим расстояние между массами до прежнего значения  $l$  (рис. 3, в). Очевидно, что в этом случае смещения положения центра масс системы не произойдет, его координата останется равной  $X''$ , а координаты тел будут равны

$$x_1'' = X'' - \mu_2 l; \quad x_2'' = X'' + \mu_1 l. \quad (15)$$

После описанного цикла система примет исходную форму. При этом координата тела  $l$  (как и любая точка системы) сдвинется на расстояние, равное  $\Delta x = x_1'' - x_1$ . Используя формулы (13), (15), получим

$$\Delta x = X'' - \mu_2 l - x_1 = \mu_1 x_1' + \mu_2 x_2' - \mu_2 l - x_1 = \mu_1(x_1 - \mu_2'\Delta l) + \mu_2(x_2 + \mu_1'\Delta l) - \mu_2 l - x_1.$$

После простых преобразований с учетом того, что  $\mu_1 + \mu_2 = 1$ ;  $\mu_1' + \mu_2' = 1$ ;  $x_2 - x_1 = l$ , получим  $\Delta x = (\mu_2 \mu_1' - \mu_1 \mu_2') \Delta l$ , затем с помощью формул (9), (11) находим окончательно результирующее смещение тела за весь цикл

$$\Delta x = \frac{m_2}{(m_1 + m_2 + \Delta m)(m_1 + m_2)} \Delta m \Delta l. \quad (16)$$

Сравнивая этот результат с полученным с помощью калибровочной теории (4), убеждаемся, что они совпадают друг с другом. Однако вычисления в рамках калибровочной теории быстрее приводят к результату.

Смещение системы можно вычислить, выбрав начало системы отсчета в точке расположения тела  $T_2$ . Нетрудно убедиться, что при этом можно получить тот же результат (16). Таким образом, можно сделать вывод, что смещение системы  $\Delta x$  калибровочно инвариантно (не зависит от выбора системы отсчета). Напомним, что в качестве условия калибровки было принято, что смещение тела вычисляется после совершения им локомоторного цикла. Отметим также, что  $\Delta x$  в формуле (4) пропорционально площади  $\Delta m \Delta l$  замкнутого контура  $l-2-3-4-l$  на фазовой плоскости (см. рис. 2), что согласуется с общими результатами калибровочной теории (см. подробнее [9]).

Для произвольной системы точечных масс мы можем также исходить из закона сохранения импульса  $\sum m_a \bar{v}_a = 0$ . Связывая систему отсчета с телом  $l$ , получим форму Пфаффа

$$d\bar{x} = -\frac{1}{m_1} (m_2 d\bar{x}_2 + m_3 d\bar{x}_3 + \dots + m_n d\bar{x}_n), \quad (17)$$



где  $d\bar{x} = d\bar{x}_1$ . Выражая переменные  $\bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n$  с помощью кинематических связей через управляемые векторы связей  $q_{ab}$  и внутренние параметры, можно представить соотношение (5) в виде (1), где калибровочные потенциалы зависят от вида связей между координатами точечных масс. Этот подход можно распространить и на случай неточечных масс.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

При разработке экспериментальной модели в соответствии со сделанными выше предположениями авторы стремились к соблюдению следующих условий: обеспечение максимально низкого коэффициента трения тел о поверхность «земли», возможность дистанционно управлять параметрами формы и изменять массы тел. Схема модели показана на рис. 4.

Для решения первой задачи (уменьшение трения) была использована воздушная дорожка *Farlow U40405*. Она состоит из воздушного компрессора 9 и профиля 10 с множеством отверстий, служащих для создания воздушной подушки. На воздушной дорожке размещаются глиссеры («тележки») 7, 8, которые могут свободно и практически без трения перемещаться вдоль профиля.

Для изменения массы на одном из глиссеров установлен резервуар 1 и насосы 2, которые позволяют закачивать и выкачивать воду из резервуара 1. Вода закачивается из канала 11, который проходит вдоль воздушной дорожки. Направление трубок выбрано таким образом, чтобы струя воды не влияла на положение глиссеров. Экспериментальная проверка подтвердила правильность сделанного выбора: в течение заполнения и опорожнения сосуда 1 смещение системы не наблюдалось.

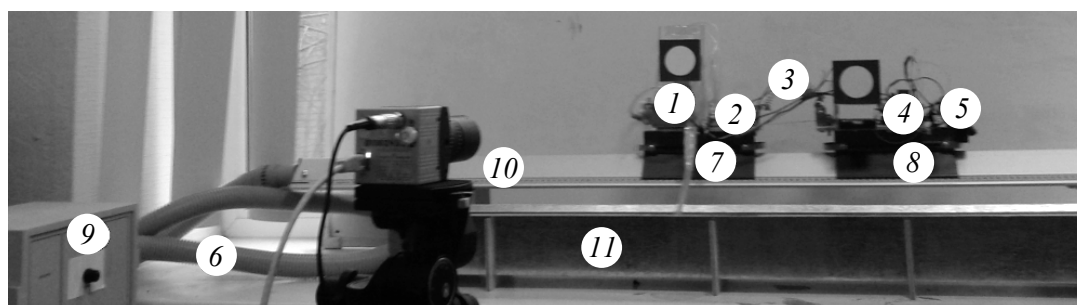
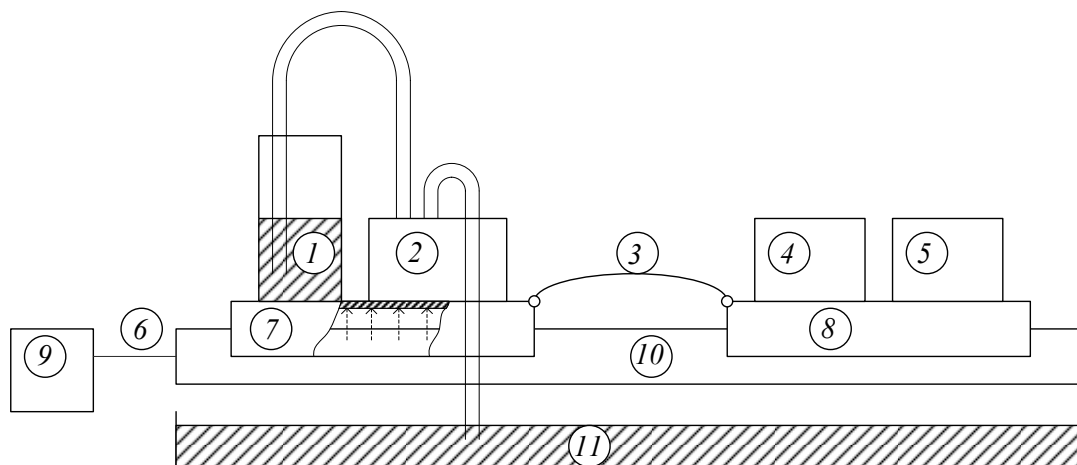


Рис. 4. Принципиальная схема модели поступательного движения и фотография натурной модели: 1 – резервуар с водой; 2 – насос; 3 – подвижное соединение; 4 – блок управления; 5 – источник питания; 6 – гибкий воздуховод; 7 – глиссер № 1, 8 – глиссер № 2; 9 – компрессор; 10 – воздушная дорожка; 11 – канал с водой

Для выкачивания и закачивания воды используются два одинаковых насоса. Количество закачанной жидкости определяется с помощью откалиброванного водомерного счетчика. При откачивании воды насос работает столько же времени, сколько работал при закачивании.

Для реализации различных режимов работы использовалась схема управления 4 на основе микроконтроллера *ATMEGA328*. Система сделана автономной для того, чтобы уменьшить влияние помех, которые могли бы быть созданы в процессе проведения экспериментов. Имеется два контура питания: система питания силовой установки (в которую входят насосы, сервопривод и реле) 5 и система питания блока управления и расходомера. Различные режимы работы задаются путем перепрограммирования системы управления.

Подвижное соединение 3 представляет собой лебедку, которая приводится в движение сервоприводом. При включении сервопривода трос наматывается на вал, притягивая глассеры друг к другу и сжимая пружину 3. При разматывании троса пружина разжимается и расстояние между глассерами увеличивается. Пружина прикреплена к глассерам с помощью шарнирного соединения.

Простой локомоторный цикл системы (см. рис. 2) состоит из 4 шагов:

1. Закачать дополнительную массу  $\Delta m$ .
2. Развести глассеры на расстояние  $\Delta l$ .
3. Откачать дополнительную массу  $\Delta m$ .
4. Свести глассеры на первоначальное расстояние  $l_0$ .

Параметры  $\Delta l$ ,  $l_0$  и  $\Delta m$  задаются в программе. Отметим, что программа позволяет задавать не только прямоугольные, но и более сложные траектории в пространстве параметров  $(l, m)$ .

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Для идентификации параметров рассматриваемой модели использовался бесконтактный метод – съемка на скоростную фотокамеру *Fastec HiSpec 1* со скоростью 10 кадров в секунду и выдержкой 2 мс. Размер кадра определялся таким образом, чтобы метки, размещенные на модели для идентификации координат, в течение всей съемки не выходили за пределы кадра. Так как камера в течение эксперимента оставалась неподвижной, то лабораторная система отсчета была привязана к самому кадру.

Для определения координат на устройстве были размещены контрастные метки в виде кругов с известным радиусом [2]. Для обработки результатов была написана программа на языке *C++* с использованием библиотеки компьютерного зрения с открытым кодом *OpenCV* [6]. Программа позволяет определять положение центров окружностей и записывает результат в файл для дальнейшей обработки.

Для определения координат центров меток использовался метод преобразования Хафа – метод поиска объектов на изображении, принадлежащих определенному классу фигур, с использованием процедуры голосования [8]. Пример фотосъемки размещен по адресу [4].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для рассмотренной нами модели был не равен нулю только потенциал  $A_l$ , который не зависит от  $l$  (см. (5)) и меняется лишь при изменении присоединенной массы  $\Delta m$ . Поэтому экспериментальной проверке была подвергнута зависимость разности потенциалов  $A_{l_2} - A_{l_1}$  от  $\Delta m$ . Величина  $(A_{l_2} - A_{l_1})|_{ex}$  пропорциональна смещению системы  $\Delta x$  за локомоторный цикл:

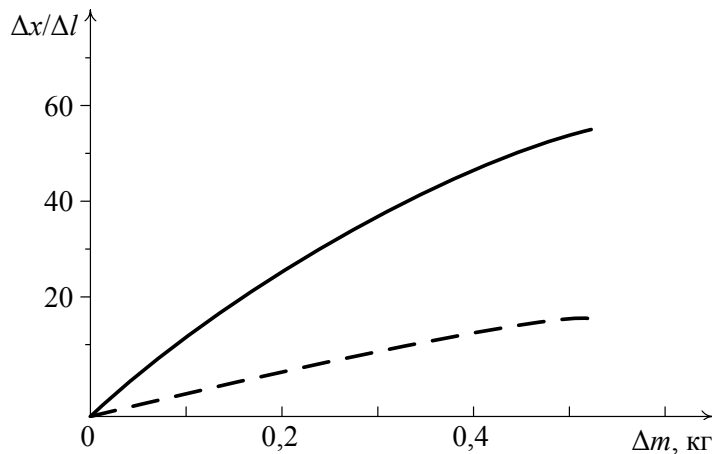


Рис. 5. Зависимость калибровочного потенциала для различных присоединенных масс. Сплошная линия – экспериментально найденное значение, пунктирная – теоретическое значение

$$(A_{l_2} - A_{l_1})|_{ex} = \frac{\Delta x}{\Delta l}.$$

Экспериментально измеряемыми величинами являются: 1) смещение системы за локомоторный цикл  $\Delta x$ ; 2) величина приращения массы  $\Delta m$ ; 3) удлинение связи  $\Delta l$ ; 4) начальные массы тел  $m_1, m_2$ , найденные путем их непосредственного взвешивания. Вычисляя величину  $\frac{\Delta x}{\Delta l}$  на основании опытных данных в зависимости от  $\Delta m$ , получим график, показанный на рис. 5 сплошной линией. В то же самое время согласно полученным выше формулам имеем теоретическую зависимость  $A_{l_2} - A_{l_1}$  от  $\Delta m$  в виде

$$(A_{l_1} - A_l)|_{theor} = -\frac{m_2}{m_1 + m_2 + \Delta m} + \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

График зависимости функции  $(A_{l_1} - A_l)|_{theor}$  от  $\Delta m$  показан на том же рис. 5 пунктирной линией.

С целью идентификации калибровочных потенциалов был проведен ряд опытов для различных значений величин  $\Delta l$  и  $\Delta m$ . После этого было найдено среднее значение калибровочного потенциала для данных  $\Delta m$  и  $\Delta l$ .

Различия теоретической и экспериментальной зависимостей связаны с допущениями, которые были сделаны при построении теоретической модели: 1) несмотря на использование воздушной дорожки, в системе присутствует трение; кроме того, как оказалось, оно зависит от массы глассеров; 2) движение модели во время изменения массы и длины связи не является квазистатическим, соответственно, начинают проявляться инерционные эффекты, за счет которых система движется быстрее и проходит за цикл несколько больший путь, чем это следует из модельных теоретических расчетов.

Как уже обсуждалось ранее, движение разбито на 4 фазы и представляет собой цикл, за который система меняет свою форму, изменяя при этом положение центра масс. Для наглядности изменение присоединенной массы, длины связи и положения одного из глассеров за время прохождения локомоторного цикла представлены вместе на рис. 6. Из-за технических особенностей реализации время, необходимое для изменения массы, намного больше, чем время, необходимое для изменения длины связи. Из-за этого график на рис. 6 дан с плавающим масштабом по оси времени.

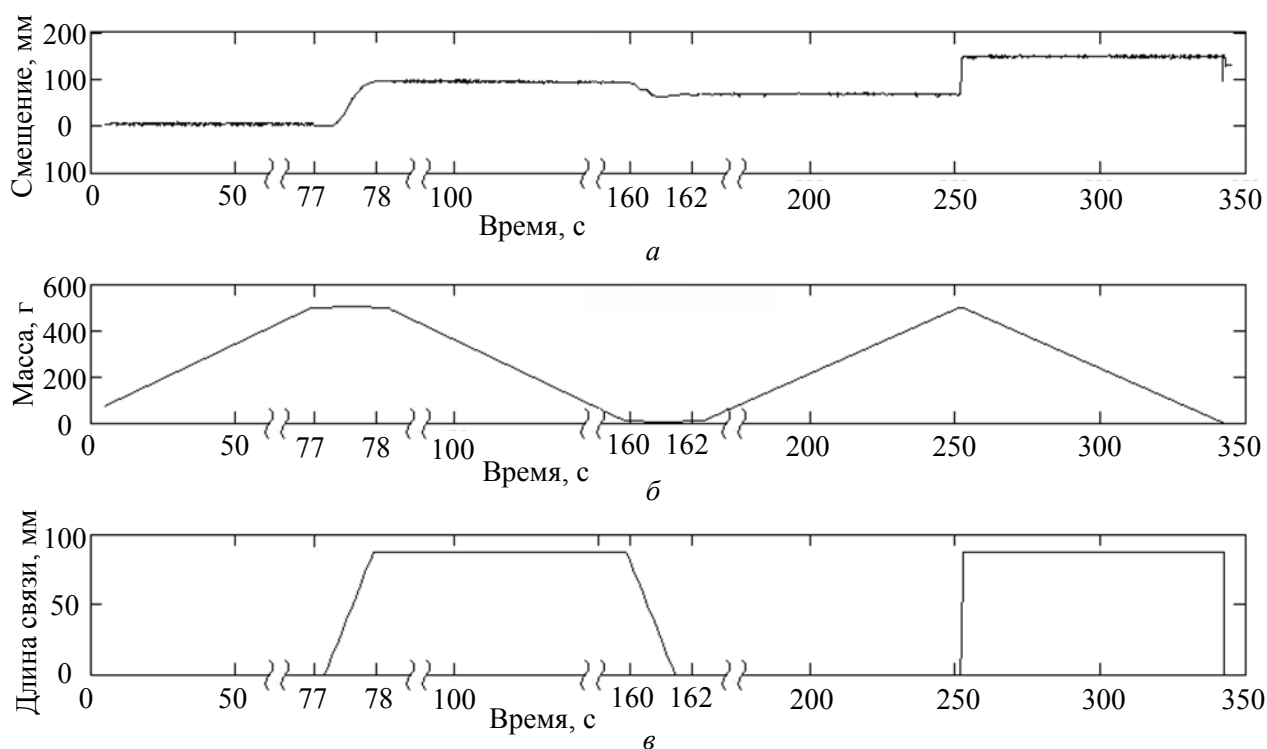


Рис. 6. Графики зависимости смещения глссера (а), изменения прибавочной массы (б) и длины связи (в) от времени. Масштаб по оси времени плавающий

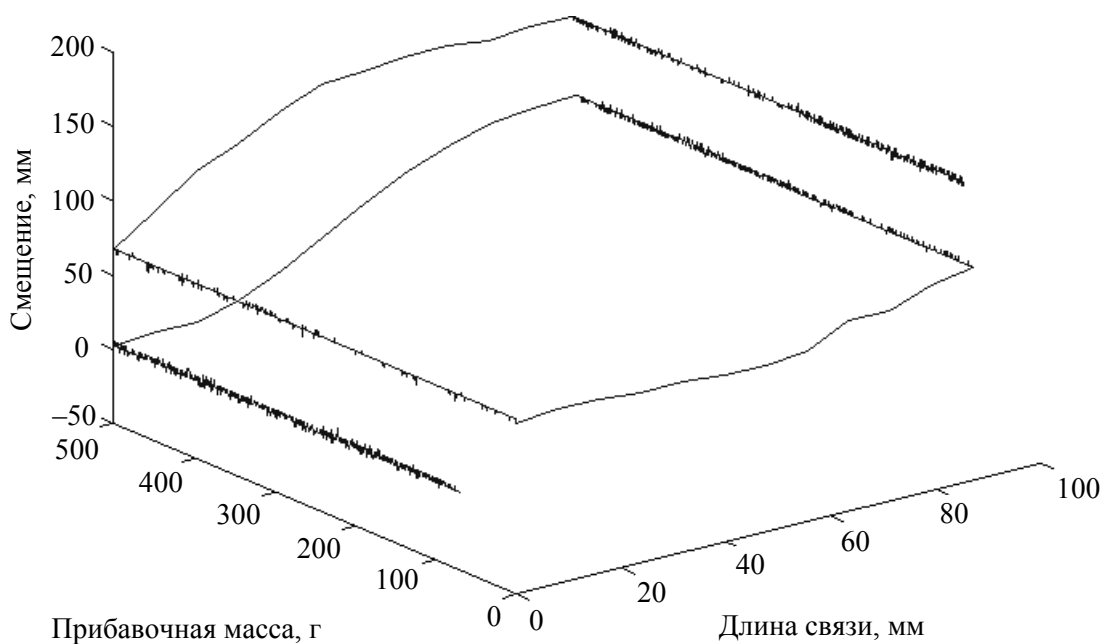


Рис. 7. Траектория движения в  $ML$ -пространстве

На рис. 7 представлен график в пространстве «масса – длина связи – смещение». Анализ рисунка показывает, что после одного полного цикла система смещается вдоль оси  $x$ , что соответствует перемещению вдоль направляющей. Из-за различного времени изменения массы и длины количество точек отличается (использовалась скоростная съемка), поэтому на участке  $m \rightarrow m + \Delta m$  кривая сильно «замусорена» большим числом точек, а на участке  $l \rightarrow l + \Delta l$  имеется гладкая кривая.

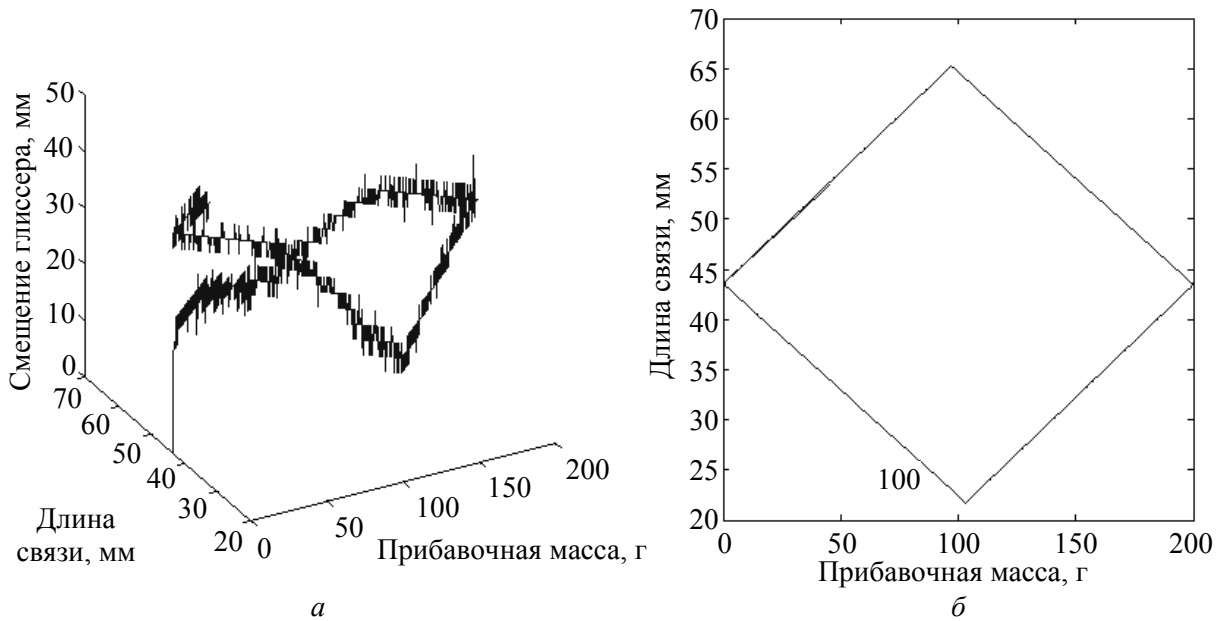


Рис. 8. График зависимости смещения глссера от присоединенной массы и длины связи (а) и траектория системы в пространстве  $ML$  (б)

Были также исследованы более сложные движения: за одну прибавку массы одновременно задавалось изменение длины от средней до максимальной и обратно, далее от средней до минимальной и обратно. При этом траектория в пространстве  $ML$  представляет собой ромб (рис. 8, б). На рис. 8, а показан график смещения глссера во время прохождения этой траектории в пространстве фом.

Из результатов этого эксперимента также следует, что перемещение модели пропорционально площади замкнутого контура, который описывает система за один цикл (уравнение (4)).

Рассмотрим также потребление энергии за весь цикл перемещения. Будем исследовать только квадратные траектории как обладающие при заданных  $\Delta m$  и  $\Delta l$  максимальными площадями и, соответственно, максимально эффективные.

В нашей реализации для изменения массы используются два насоса одинаковой мощности, которые закачивают и выкачивают воду из емкости. Потребляемая мощность насосов не изменяется во время работы и равна 12 Вт (6 В на 2 А) для каждого из насосов. Изменение длины связи осуществляется с помощью сервопривода, который потребляет во время движения также 12 Вт (6 В на 2 А).

Особенностью реализации авторов является то, что время закачки жидкости  $\tau_1$  намного больше времени  $\tau_2$ , за которое изменяется расстояние между глссерами (на набор и сброс 100 мл воды затрачивается 13,3 с, на изменение длины – порядка 1 с). Энергия, затрачиваемая на один цикл с заданными  $\Delta m$  и  $\Delta l$ , составляет

$$W = 2(P_{\text{нас}} \tau_1 + P_{\text{срв}} \tau_2),$$

где  $P_{\text{нас}}$  – мощность насоса, Вт;  $P_{\text{срв}}$  – мощность сервопривода, Вт.

$$\tau_1 = \frac{\Delta m}{q_1}, \quad \tau_2 = \frac{\Delta l}{q_2},$$

где  $q_1$  – скорость набора жидкости, кг/с;  $q_2$  – скорость изменения длины связи, м/с.

Из-за того, что время изменения связи меньше, чем время набора массы, увеличение скорости передвижения возможно при уменьшении присоединенной массы и одновременном увеличении длины связи. Увеличение скорости приведет к увеличению потребления энергии.

## Выводы

1. В работе построена теоретическая модель и проведены натурные эксперименты, показывающие возможность поступательного самодвижения системы связанных тел при отсутствии трения, осуществляемого за счет изменения формы и присоединения массы. Присоединенная масса в этом случае выступает аналогом трения, которое используют ходящие и ползающие объекты. Так как масса берется извне рассматриваемой системы, то она (система из связанных глассеров) не является замкнутой.

2. Наиболее последовательная интерпретация результатов эксперимента достигается в рамках понятий калибровочной модели, к числу которых относятся: понятие о калибровочных потенциалах, траектория в пространстве форм и расслоение пространства, связность и голономия. Условия связности – это соотношение (3), которое задает изменение положение тела в пространстве при изменении его формы, а голономия – это смещение тела при совершении полного цикла в пространстве форм. Также экспериментально показано, что смещение за период пропорционально площади траектории в пространстве форм.

3. Представляет интерес дальнейшее развитие теории и проведение экспериментов для учета большего числа внутренних степеней свободы, одновременного учета не только поступательного перемещения, но и поворота объекта. Также необходим последовательный учет инерционных эффектов как в теоретических расчетах, так и в экспериментах. Наконец, необходимо научиться находить эффективно присоединенные массы при анализе локомоторного движения естественных и искусственных объектов в реальных условиях хождения, ползания и т.п. Это позволит учитывать количественные показатели в теории локомоторных перемещений, что даст возможность с новой точки зрения анализировать биомеханику постуральных локомоций человека, таких как спортивная ходьба, бег, прыжки и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноцкий С.И., Дербов В.Л., Дубовик В.М., Марковски Б.Л., Степановский Ю.П. Топологические фазы в квантовой механике и поляризационной оптике // Успехи физических наук. – 1990. – Т. 160, № 6. – С. 1–49.
2. Кетов А.И., Марценюк М.А., Складенко М.С., Тетерин П.А. Идентификация локомоторного движения мехатронной модели // Вестник Пермского университета. – 2007. – Вып. 10. – С. 19–22.
3. Кислухин Н.М., Марценюк М.А., Бекурин Д.Б. Компьютерная модель плавания самодформирующегося тела в вязкой жидкости // Гидродинамика. – 2004. – Вып. 14. – С. 21–50.
4. Пример съемки скоростной фотокамерой [Электронный ресурс]. – URL: [http://learn.info/sci/500ml\\_150deg\\_single\\_21092013\\_113932.zip](http://learn.info/sci/500ml_150deg_single_21092013_113932.zip) (дата обращения: 03.05.2014).
5. Смолянинов В.В. Пространственно-временные задачи локомоторного управления // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 10. – С. 1063–1018.
6. Bradsky G., Kaehler A. Learning *OpenCV*: computer vision with the *OpenCV* library. – Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2008. – 580 p.
7. Kelly S.D. The mechanics and control of robotic locomotion with applications to aquatic vehicles: Ph.D. thesis. – Pasadena, 1998. – 123 p.
8. Leavers V.F. Shape detection in computer vision using the hough transform. – London: Springer-Verlag, 1992. – 201 p.
9. Littlejohn R.G., Reinsch M. Gauge fields in the separation of rotations and internal motions in the n-body problem // Rev. Mod Phys. – 1997. – Vol. 69, № 1. – P. 213–274.

10. Pedler T.J., Kessler J.O. Hydrodynamics phenomena in suspensions of swimming organisms // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 1992. – Vol. 24. – P. 313–358.
11. Shapere A., Wilczek F. Gauge kinematics of deformable bodies // *American Journal of Physics.* – 1989. – Vol. 57, is. 6. – P. 514–518.
12. Shapere A., Wilczek F. Geometry of self-propulsion at low Reynolds number // *J. Fluid Mech.* – 1989. – Vol. 198. – P. 557–585.
13. Umedachi T., Takeda K., Nakagaki T., Kobayashi R., Ishiguro A. A soft deformable amoeboid robot inspired by plasmodium of true slime mold // *IJUC.* – 2011. – Vol. 7, № 6. – P. 449–462.

## **EXPERIMENTAL MODEL OF PROGRESSIVE LOCOMOTIONS OF BIOLOGICAL OBJECTS**

**M.A. Martsenyuk, S.S. Sypachev (Perm, Russia)**

Biological objects implement locomotions on account of change of shape of their bodies. In many published works, there are given scrupulous studies of kinematics of motions. But, relationships between deformation of body and displacement in space are not investigated. In our article, we investigated a model of self-deformable body and associated alteration of body shape at progressive motion (locomotory relation). For quantitative calculation of frictional resistance effect, we proposed model with additional mass which is joined to different points of body during the experiment. The locomotory relation is based on momentum conservation law in a Pfaff differential form. A real-life model of a body suspended on an airway was developed (airway is made as rigid section with set of apertures designed to create air cushion). Progressive motion was achieved by changing shape and mass of body. Mass was changed in such a way that it does not effect on body position. Control was implemented by programmable microcontroller. This had made it possible to change control mode and use different curves in space of parameters. For identification of coordinates of the system, contrastive markers were placed on the body whose positions were recorded using high-speed photography and computed using methods of computer vision. After that, progressive motion gauge potential was identified. The experiments showed consistency with the gauge theory.

**Key words:** gauge theory, joined mass, self-motion, translatory self-motion, model of translatory motion, locomotions, high-speed camera, photo survey.

*Получено 30 июня 2014*