

Научная статья

УДК 531.384

DOI: [10.34759/trd-2022-122-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-01)

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ АМОΡФНЫХ УСТРОЙСТВ

Алексей Петрович Софьин¹✉, Людмила Анатольевна Федорова², Юрий Михайлович Сударь³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3}vka@mil.ru✉

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с созданием и применением нового типа двигателей для использования в робототехнических и транспортных устройствах. Показано, что применение двигателей амебоидного типа имеет несомненные достоинства по сравнению с уже существующими аппаратами. Поставлены основные задачи, которые необходимо решить в процессе проектирования подобных двигателей. Для построения математической модели движения выбрана расчетная схема, базирующаяся на выборе цилиндрической формы устройства,двигающегося по шероховатой наклонной плоскости. Представлены базовые дифференциальные уравнения для построения математической модели движения.

Ключевые слова: двигатель, робот, движение, условия, способ, модель, конструкция

Для цитирования: Софьин А.П., Федорова Л.А., Сударь Ю.М. К вопросу применения аморфных устройств // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-01)

ON THE ISSUE OF THE USE OF AMORPHOUS DEVICES

Alexey P. Sofin¹, Lyudmila A. Fedorova², Yuri M. Sudar³

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

^{1,2,3}yka@mil.ru

Abstract. Amoeboid movement application in robotic and transport devices is associated with partial repetition of movements existing in nature. Design of prospective devices with amoeboid thrusters will require the research based on the dynamic computations of the object. Mathematical model forming therewith depends directly on the device structure and established option of its movement. The main tasks needed to be solved while such kind of propulsor design are set. A cylindrical body rolling along a rough plane was selected as the object. The external forces applied to the cylinder are being reduced to the resultant vector, which, together with the point of contact, determines the plane of motion position. The device body contacts with the rough surface via the protruding pseudopods. Its orientation in space may be altered by the liquid volumes moving inside the rigid hull, which allows changing position of the point of contact with the surface and the resultant vector of external forces.

The device movement in one of the planes is being considered in the course of dynamic computation. With this, the limit values of the force under which contact of the cylindrical body rolling both without and with sliding is being exercised, are being determined. The other problem being solved is associated with determining characteristics of movement of mass center of the hull and its rotation relative to the axis passing through the center of mass center.

The numerical study results reveal the presence of characteristic sections of motion determined by the selected parameters of the problem. The performed computations accuracy corresponds to the model being used.

The complex of kinematic indicators should ensure the forming of requirements for the control laws for the device being developed. Devices with amoeboid propulsors may be considered as bodies with a movable internal mass.

In the prospect, amoeboid propulsors may prove to be more efficient means of motion and transportation compared to the conventional wheeled and rotary mechanisms. The extremely low impact on the environmental objects associated with low ground pressure and trifling atmospheric emission should be considered the most important advantage of the amoeboid aggregates application.

A detailed study of the implementation options for each method of movement points at the significant number of their variety, and they are fully dependent on the concrete conditions and functions being realized. Along with the typical ones, the presence of the variety of transitional and combined forms of movement should be accounted for. Modern literature analysis allows soundly consider that the next stage of the studies development

related to the amoeboid devices creation seems to be application of a device with basic hull shape in the form of a sphere.

Keywords: mover, robot, movement, conditions, method, model, construction

For citation: Sofin A.P., Fedorova L.A., Sudar Y.M. On the issue of the use of amorphous devices. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-01)

Введение

Человечество широко использует идеи, основанные на изучении природных явлений и процессов. Известно, что выбор движителей аппаратов различного типа связан, как правило, с имитационным повторением типичных движений, уже существующих в окружающей нас природе. Детальное изучение вариантов реализации каждого способа движения показывает, что имеется значительное число их разновидностей, и оно полностью зависит от конкретных условий и реализуемых функций. Наряду с типовыми, необходимо также учитывать наличие множества переходных и комбинированных форм движений.

К настоящему моменту времени практически не используемым в технике остается амебоидный способ движения, характерный для амеб, а также некоторых клеток у многоклеточных животных (например, лейкоцитов крови человека). На основе изучения движения амеб можно предложить еще один способ передвижения современных роботов и транспортных средств. В общем случае для него потребуется использовать выполненный из прочного эластичного материала и способный менять форму корпус [1]. Выбранные способы изменения формы корпуса определяют

уровень возможности разработки различных вариантов конструкций, для которых предполагается использовать мягкие емкости со специальными жидкостями (газами), насосы, компрессоры и наборы клапанов. Реализуемая технология должна позволять сжимать те или иные части корпуса и последовательно или параллельно растягивать другие.

Особенности реализации амебоидного способа движения

Рассмотрение амебоидного способа движения показывает его основной отличительный признак - отказ от колес или гусениц, которые однозначно определяют главный недостаток существующих и широко используемых средств передвижения – довольно низкую проходимость и надежность. Использование транспортных средств в сложных природных условиях, например, Крайнего Севера, выдвигает взаимоисключающие требования к создаваемой и применяемой технике. Они связаны с необходимостью обеспечения высокой проходимости при низком воздействии на объекты природной среды.

При функционировании аппарата, использующего амебоидный способ движения, естественным образом исчезает необходимость учета многих факторов окружающей среды. Предполагаемую в настоящее время низкую скорость движения таких устройств следует считать основным недостатком, на фоне которого достигается технологическое дублирование элементов аппаратов и реализуется их перемещение путем выполнения того или иного набора выбранных движений. Обладая высокой конструктивной устойчивостью в процессе эксплуатации,

устройства, использующие такой способ перемещения, могут оказаться достаточно невосприимчивыми по отношению к воздействию факторов окружающей среды или даже человека. Кроме того, в отличие от существующих аппаратов при использовании амебоидного способа возникает возможность проезда по сложной пересеченной местности и, в основном, исчезает проблема обеспечения необходимого сцепления ходовой части с поверхностью передвижения.

Более детальное изучение вариантов конструкций аппаратов с использованием кинематических пар позволяет отметить, что в процессе их эксплуатации могут происходить следующие негативные процессы:

- засорение пространства между звеньями и значительное повреждение (износ) контактных поверхностей трущихся пар, а также чувствительных элементов датчиков и отражающих сигналы поверхностей;

- разжижение или размягчение твердых структур, вплоть до выкипания жидких материалов;

- ухудшение показателей свойств масел и смазок с выходом их значений за установленные пределы.

В настоящее время имеют место попытки выполнения устройств [1, 2], использующих принцип амебоидного способа движения. В природе амебоидное движение обеспечивается образованием выростов, называемых корненожками, на поверхности передвигающегося объекта. Как раз эти выпячивания в конструктивном плане реализуют задачу создания и использования аморфной формы корпуса. Их

появление в установленных точках на поверхности оболочки обеспечивает контакт с поверхностью движения.

Конструктивная реализация устройства, позволяющего выпячивать выросты, потребует создания оболочки, растягивающейся по всей внешней поверхности или на выбранных участках. На рис. 1 представлен вариант выполнения внешней оболочки устройства, реализующего амебоидный вариант передвижения.

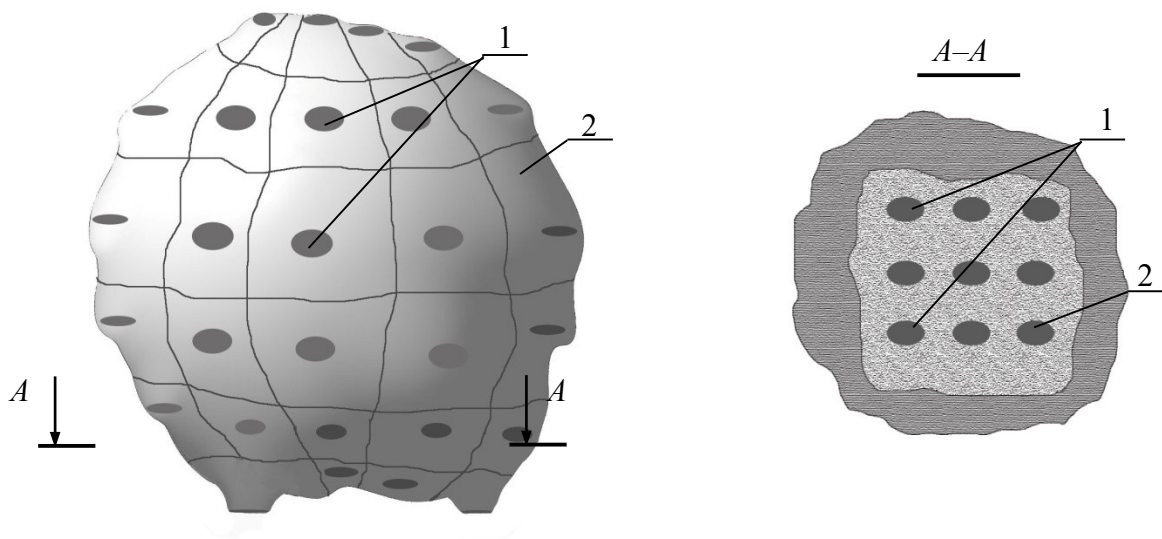


Рис. 1

1 – отсек корненожки; 2 – внешняя оболочка.

Подробное описание типичного аморфного робота представлено в [2]. Материалы указанного патента предлагают использовать вариант амебоидного движения, связанного с «переползанием» механической системы, использующей выдвигающиеся корненожки. В техническом плане использование поступательного движения не позволяет провести широкое внедрение рассматриваемого способа. В тоже время сочетание амебоидных особенностей с вращательным движением позволяет рассматривать устройства, близкие к классическим вариантам технических аппаратов.

Процесс разработки устройства с очевидным наличием признаков амебоидного движения связан с необходимостью решения следующих задач:

- обеспечения исходного состояния равновесия устройства;
- создания внешних сил, достаточных для преодоления сопротивления движению, путем перераспределения масс внутри оболочки корпуса;
- формирования процесса перераспределения масс по сигналам управляющих систем.

Интерес к амебоидным движителям проявляют специалисты во многих странах [3]. Можно считать, что машина, в которой реализуется амебоидный способ передвижения, в будущем позволит обеспечить высокую проходимость по каменистой и рыхлой поверхности (грунту) - льду, снегу.

Отметим главные достоинства таких устройств:

- герметичный мягкий корпус будет лучше защищен от любых погодных факторов и ударов;
- предусмотренное изменение внешней формы станет полезным в условиях сильного запыления, появление выростов позволит обеспечить стряхивание пыли и песка прямо во время движения.

Внимательное рассмотрение амебоидного способа показывает, что он обеспечивает приоритет использования и может быть применим в целом ряде случаев:

- в условиях, когда применение транспортных средств с классическими колесами и даже гусеницами полностью или частично не гарантирует решения поставленных задач;

- в зонах территорий выявленного проскальзывания колес;

- при необходимости использования малогабаритных аппаратов с низкими энергетическими потребностями;

- для обеспечения низкого уровня воздействия на поверхность и исключения разрушения или повреждения верхнего слоя;

- при возникновении сложностей с подбором смазки и отсутствии надежных узлов трения.

Еще одним очевидным преимуществом амебоидных роботов и транспортных устройств, отличающих их от колесных машин, можно считать возможность расширения диапазона массо-габаритных характеристик использования различных размеров аппаратов: от миниатюрных до достаточно крупных устройств весом в сотни килограммов и выше.

Детальное рассмотрение всех вопросов позволяет считать, что область применения аморфных устройств практически не имеет ограничений. И все же на этапе развития данного класса аппаратов основные задачи, которые можно отнести к сфере их использования, целесообразно свести к следующим:

- доставка малогабаритных грузов;

- наблюдение (сбор фото- и киноматериалов);

- мониторинг температурно-влажностного режима и различных негативных факторов на обследуемой территории;
- обеспечение спасательных операций МЧС.

Аппараты с амебоидным движителем можно применять как на Земле, так и на других планетах, при выполнении разноцелевых операций, начиная от доставки грузов и кончая спасательными операциями. Конкретный алгоритм движения таких аппаратов полностью зависит от выбранной конструкции оболочки аморфного устройства.

Вопросы проектирования движителей

Первоначальную проработку конструкции и описание движения устройств с амебоидным движителем удобнее всего рассматривать как сложное движение аппарата, привязанное к перемещению центра масс [3] и состоящее из двух движений:

- переносного, вместе с центром масс;
- вращения относительно центра масс.

Применение устройств, использующих амебоидное движение, требует разработки соответствующих математических моделей, для чего предварительно необходимо решить следующие технические проблемы:

- выбора варианта конструкции устройства, включая элементы, обеспечивающие движение;
- определения способа реализации амебоидного движения и порядка возникновения амебоидных выростов;

- уточнения способа управления - порядка срабатывания исполнительных элементов;

- определения источников энергии для осуществления перемещения.

Основные предпосылки к проектированию устройства, использующего амебоидный способ движения, можно рассматривать, выбрав в качестве образца неоднородное цилиндрическое тело, катящееся по неподвижной плоскости (рис. 2). Плоское движение этого тела нужно исследовать в одном из вариантов перемещения объемов жидкости внутри жесткой оболочки корпуса и приведения в этом случае внешних сил к главному вектору \vec{P} , определяющему расположение плоскости движения.

При этом следует считать, что выбранный образец контактирует с шероховатой поверхностью посредством выпирающих псевдоподий, образующихся на внешней эластичной оболочке корпуса при наполнении их жидкостью. Плоскость, проходящая через точку приложения главного вектора внешних сил \vec{P} и точку контакта аппарата с шероховатой поверхностью, перпендикулярной образующей цилиндра, является плоскостью движения.

Ее ориентацию в пространстве можно изменить перемещением объемов жидкости внутри жесткого корпуса, что изменит точку приложения и линию действия главного вектора внешних сил \vec{P} . Наполнение жидкостью другой псевдоподии изменит положение точки контакта объекта с шероховатой поверхностью. Таким образом, можно вызвать движение амебоидного аппарата в любой плоскости. Этот процесс должен регулироваться системой управления.

Рассматривая движение аппарата в одной из плоскостей, необходимо определить:

1) предельное значение силы \vec{P} , под действием которой осуществляется его качение без скольжения по негладкой наклонной плоскости;

2) проанализировать его движение с остановками, определить момент времени, в который происходит остановка;

3) найти кинематические характеристики движения центра тяжести аппарата и его вращения вокруг оси, проходящей через центр тяжести перпендикулярно плоскости движения.

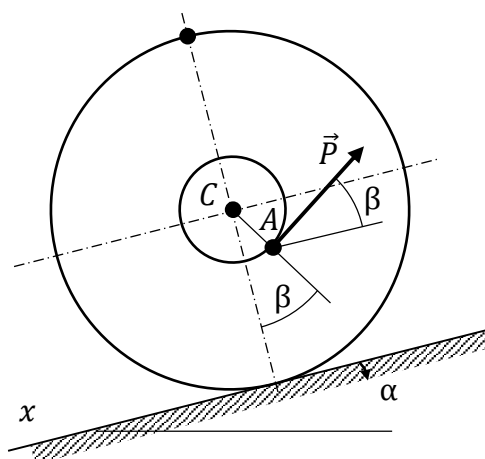


Рис. 2

где α – угол наклона неподвижной плоскости к горизонту, β – угол, определяющий положение точки A (точка приложения силы P); C - центр масс.

Вопросы исследования движения тел при их качении по поверхностям рассмотрены в ряде работ [4-10]. Проработка теоретических вопросов создания моделей движений базируется на классических теориях, изложенных в [11-16].

Представляет интерес вопрос о том, будет ли остановка аппарата мгновенной или после остановки он становится неподвижным, а также вопрос о влиянии силы \vec{P} на характер его движения, т.е. определение значений силы \vec{P} , обеспечивающей движение аппарата вверх или вниз по шероховатой поверхности.

Таким образом, математическая модель исследования движения аппарата предусматривает:

- 1) определение значений силы \vec{P} , под действием которой объект будет катиться по наклонной плоскости без проскальзывания и со скольжением;
- 2) определение кинематических характеристик движения центра тяжести аппарата, а также его вращения вокруг оси, проходящей через центр тяжести перпендикулярно плоскости движения.

Разработка математической модели основана на выбранной расчетной схеме (рис. 3).

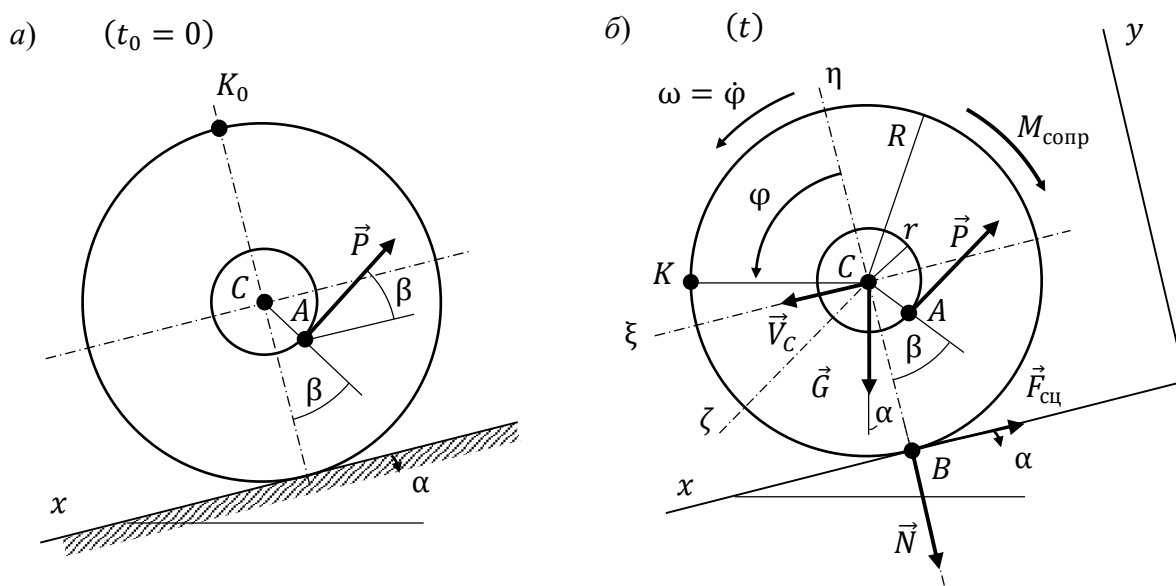


Рис. 3

а) - к схеме движения; б) к определению параметров,

где R , r – радиус большой и малой окружностей сечения цилиндра вертикальной плоскостью, проходящей через центр масс C ; K – фиксированная точка на наружной поверхности цилиндра, совпадающая в начальный момент с точкой K_0 ; x , y – оси условно неподвижной системы координат; ξ , η , ζ – оси системы координат, связанной с центром масс C объекта; точка B – мгновенный центр скоростей; φ – угол поворота объекта; ω – его угловая скорость; \vec{V}_C – скорость центра масс; \vec{G} – сила тяжести; $\vec{F}_{\text{сц}}$ – сила сцепления; \vec{N} – нормальная реакция; $M_{\text{сопр}}$ – момент сопротивления качению.

В дальнейших исследованиях рассматриваем аморфный робот как цилиндрический каток и исследуем его движение по шероховатой наклонной плоскости. Робот контактирует с наклонной плоскостью посредством псевдоподий, совершая при этом плоское движение.

Известно, что плоское движение тела можно рассматривать как совокупность двух движений: поступательного движения плоской фигуры вместе с полюсом, в качестве которого при решении динамических задач рассматривается центр масс тела, и вращательного движения вокруг оси $C\zeta$, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости движения.

Тело, совершающее плоское движение, имеет три степени свободы, которым соответствуют три обобщенные координаты: декартовы координаты центра масс Cx_C, y_C и угол поворота тела φ .

Дифференциальные уравнения плоского движения цилиндра как твердого тела имеют вид

$$\begin{aligned}
m \ddot{x}_C &= \sum_1^n \vec{r}_{kx}^e = F_x^e, \\
m \ddot{y}_C &= \sum_1^n \vec{r}_{ky}^e = F_y^e,
\end{aligned}
\tag{1.1}$$

$$I_{C\xi} \varepsilon = \sum_1^n M_{C\xi} (\vec{r}_k^e) = M_{C\xi}^e \varepsilon,$$

где m – масса тела; F_x^e, F_y^e – проекции главного вектора внешних сил, приложенных к телу, на оси x и y ; $I_{C\xi}$ – момент инерции тела относительно оси $C\xi$, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения xu ; $M_{C\xi}^e$ – главный момент всех внешних сил, приложенных к телу, относительно оси $C\xi$; ε - угловое ускорение.

Так как рассматривается плоское движение несвободного тела, т.е. движение робота с наложенной стационарной внешней связью (шероховатой наклонной плоскостью), то в уравнения (1.1), кроме неизвестных $\ddot{x}_C, \ddot{y}_C, \ddot{\varphi}$, войдут еще реакции внешней связи. В этом случае к уравнениям (1.1) присоединяются дополнительные уравнения, при составлении которых необходимо учитывать ограничения, наложенные на тело внешней связью (уравнения связи).

Интегрируя уравнения (1.1) дважды, в ходе дальнейших расчетов можно получить кинематические характеристики плоского движения объекта

$$\begin{aligned}
\dot{x}_C &= v_x(t), \quad \dot{y}_C = v_y(t), \quad \dot{\varphi} = \omega(t), \\
x_C &= x_C(t), \quad y_C = y_C(t), \quad \varphi = \varphi(t)
\end{aligned}$$

Для определения шести постоянных интегрирования используются начальные условия движения тела. Начальными условиями обычно являются координаты центра масс x_{C0}, y_{C0} и угол поворота φ_0 в начальный момент $t_0 = 0$, а также проекции

начальной скорости центра масс на оси координат $\dot{x}_{C0}, \dot{y}_{C0}$ и начальная угловая скорость $\dot{\varphi}_0$.

Результаты численного исследования характера движения объекта в зависимости от выбранных параметров задачи

Разработанная модель движения позволила исследовать влияние модуля силы \vec{P} на характер движения аппарата. За начальное положение устройства примем его положение при остановке (рис. 4а, б). Расчеты выполнены при следующих заданных величинах:

$m = 300$ кг; $R = 0,8$ м; $r = 0,2$ м; $\alpha = 18^\circ$; $\beta = 30^\circ$; коэффициент трения покоя (коэффициент сцепления) $f_{\text{сц}} = 0,2$; коэффициент трения качения $\mu = 0,0075$ м.

Начальные условия при $t_0 = 0$:

$\varphi_0 = 0$, $\omega_0 = 5,0$ рад/с, $x_{C0} = 0$, $V_{C0} = 4$ м/с.

В данной работе опустим выполненные преобразования и вычисления и представим основные результаты:

- получены пороговые значения модуля силы \vec{P} , при которых изменяется характер движения объекта;

- дана оценка характера движения объекта при изменении модуля силы \vec{P} ;

- исследовано изменение модуля и направления силы сцепления в зависимости от характера плоского движения объекта, то есть от модуля силы \vec{P} .

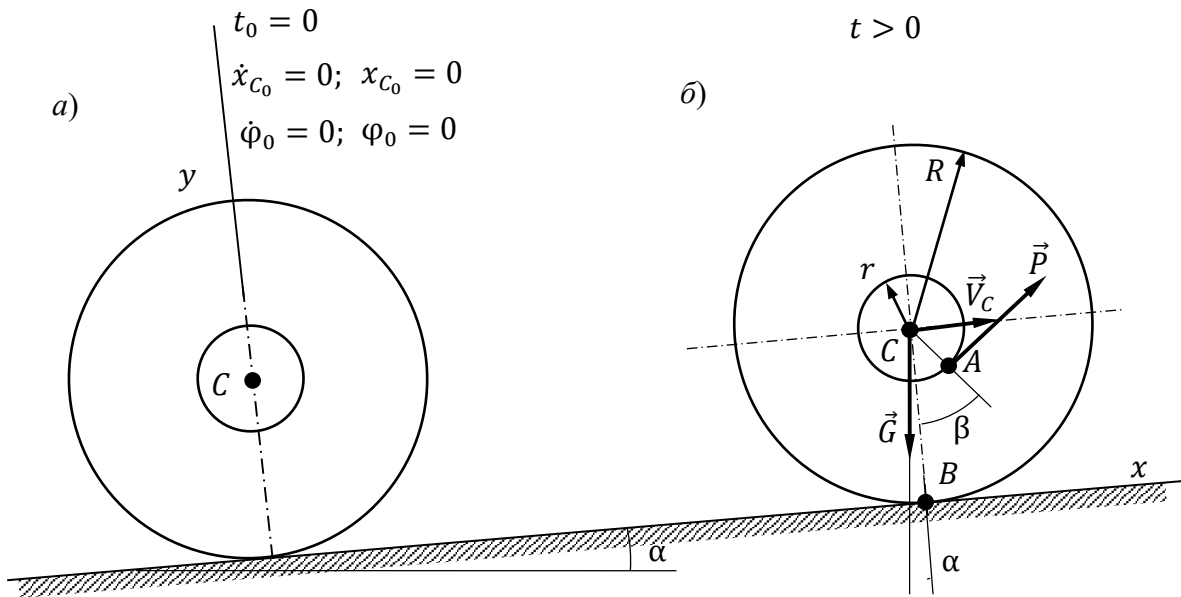


Рис. 4

а) - к схеме движения; б) к определению параметров.

Влияние модуля силы \vec{P} на характер его движения показано на рис. 5. Из графика (рис. 5) видно:

- I участок: $0 \leq P < 1507,42 \text{ Н}$.

Робот лежит на связи, происходит его плоское движение на спуск без скольжения.

- II участок: $1507,42 \leq P < 1530,31 \text{ Н}$.

Робот лежит на связи, происходит его плоское движение на подъем без скольжения.

- III участок: $1530,31 \leq P < 5597,92 \text{ Н}$.

Робот лежит на связи, происходит его плоское движение на подъем со скольжением.

- IV участок: $5597,92 \leq P \text{ (Н)}$.

Объект покидает связь, происходит его свободное плоское движение.

В работе учитывалось изменение силы сцепления в зависимости от характера плоского движения объекта, то есть от модуля силы \vec{P} .

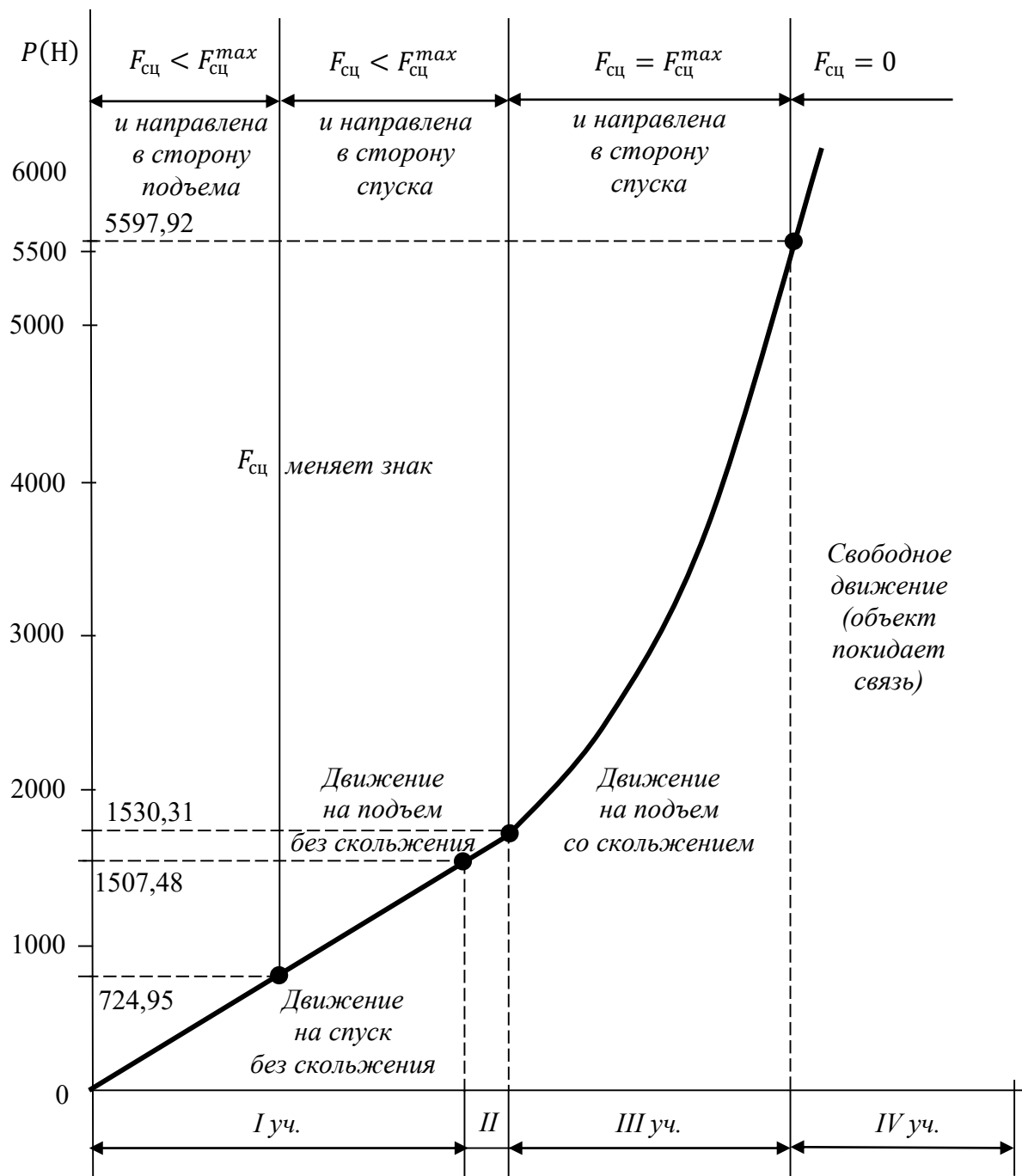


Рис. 5. Изменение характера движения объекта

Выводы

Проектирование устройств, использующих амeboидный принцип движения, связан с обязательным проведением динамического расчета. Именно определенные параметры входят в состав исходных данных, определяющих физическую модель и конкретную конструкцию устройства. Уточняющие обстоятельства могут быть связаны с выбором способов управления аппаратом при его движении. В рамках формирования законов управления несомненный интерес вызывает появление значительного числа работ, связанных с изучением движения тел с подвижной массой [17-18]. Анализ современной литературы позволяет обоснованно считать, что следующим этапом развития исследований, связанных с созданием амeboидных устройств, представляется использование аппаратов с базовой формой в виде сферы. Этому будет способствовать накопленный к настоящему времени значительный теоретический материал [19-21].

В ходе исследований изучен характер движения объекта без отрыва от связи (шероховатой наклонной плоскости). В зависимости от параметров задачи определены различные режимы движения и дано их полное качественное описание.

Амебоидные движители в перспективе могут оказаться более эффективными средствами передвижения и транспортировки по сравнению с существующими колесными и роторными механизмами. Важнейшим аспектом применения амeboидных агрегатов следует считать крайне низкое воздействие на объекты окружающей природной среды, связанное с низким давлением на грунт, и незначительные выбросы в атмосферу. Перспективные исследования устройств с

амебоидным движением потребуют рассмотрения более сложных в описании вариантов движения и конструктивных схем аппаратов.

Список источников

1. Ардашов А.А. Силантьев С.Б., Софьин А.П., Федорова Л.А. Состояние и перспективы развития движителей космических роботов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.2017. Вып. 656. С. 85-91.
2. Arthur T.Bradley. Locomotion of amorphous surface robots //Patent 8662213 USA, 04.03.2014.
3. Софьин А.П., Федорова Л.А. К вопросу применения аморфных типов космических роботов // Экология и развитие общества. 2019. № 1 (28). С. 57-60.URL: <http://www.maneb.ru/node/297>
4. Капустина О.М. Анализ нормальной реакции в задаче о качении без скольжения диска по неподвижной плоскости // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. 2011. №4-5. С. 2222–2223.
5. Виноградова О.А. Движение цилиндра по подвижной плоскости с трением // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20–24 августа 2015): сборник докладов. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. С. 766-768.
6. Виноградова О.А. Движение цилиндра по подвижной плоскости с трением // Прикладная математика и механика. 2016. №80. С. 444-449.

7. Демидова Н.С. Сравнение трения при качении и трения при скольжении колеса в лекциях по механике // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2017. №4(14). С. 14.
8. Кулешов А.С., Трещев Д.В., Иванова Т.Б., Наймушина О.С. Твердый цилиндр на вязкоупругой плоскости // Нелинейная динамика. 2011. Т. 7. №3. С. 601-625.
9. Лагошная Е.А., Герасименко С.В., Бондаренко Л.Н. Влияние сопротивления качению цилиндра на качение без скольжения // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2018. №1(5). С. 127-135.
10. Бреки А.Д., Стариков Н.Е., Провоторов Д.А., Агеев Е.В., Гвоздев А.Е. О качении шара и цилиндра по криволинейной поверхности с вязкой прослойкой из жидкого смазочного композиционного материала // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: техника и технологии. 2015. № 4(17). С. 8-12.
11. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Динамика. - М.: Наука, 1983. Т. II. - 640 с.
12. Нарыжный В.А. Динамика. - М.: НИЯУ МИФИ, 2012. - 168 с.
13. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Теоретическая механика.– СПб.: Лань, 2008. - 736 с.
14. Арсеньев О.Н., Горшков Л.К. Теоретическая механика. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. - 218 с.
15. Маркеев А.П. Динамика тела, соприкасающегося с твердой поверхностью. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. - 336 с.
16. Сумбатов А.С., Юнин Е.К. Избранные задачи механики систем с сухим трением.

- М.: Физматлит, 2013. - 194 с.

17. Панёв А.С. О движении твердого тела с подвижной внутренней массой по горизонтальной поверхности в вязкой среде // Труды МАИ. 2018. №98. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=90072>

18. Бардин Б.С., Панёв А.С. О периодических движениях тела с подвижной внутренней массой по горизонтальной поверхности // Труды МАИ. 2015. №84.

URL:<http://trudymai.ru/published.php?ID=62995>

19. Борисов А.В., Килин А.А., Мамаев В.С. Как управлять шаром Чаплыгина при помощи роторов // Нелинейная динамика. 2012. №8. С. 289-307.

20. Борисов А.В., Мамаев И.С. Качение неоднородного шара по сфере без скольжения и вращения // Нелинейная динамика. 2006. Т. 2. С. 445-452.

21. Зобова А.А., Трещев Д.В. Шар на вязкоупругой плоскости // Труды математического института имени В.А.Стеклова. 2013. Т. 281. С. 98-126.

References

1. Ardashov A.A., Silant'ev S.B., Sof'in A.P., Fedorova L.A. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2017, vol. 656, pp. 85-91.

2. Arthur T. Bradley. Locomotion of amorphous surface robots, *Patent 8662213 USA*, 04.03.2014.

3. Sof'in A.P., Fedorova L.A. *Ekologiya i razvitie obshchestva*, 2019, no. 1 (28), pp. 57-60. URL: <http://www.maneb.ru/node/297>

4. Kapustina O.M. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo*, 2011, no. 4-5, pp. 2222–2223.
5. Vinogradova O.A. *XI Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki: sbornik dokladov*, Kazan', Kazanskii (Privolzhskii) federal'nyi universitet, 2015, pp. 766-768.
6. Vinogradova O.A. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2016, no. 80, pp. 444-449.
7. Demidova N.S. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2017, no. 4(14), pp. 14.
8. Kuleshov A.S., Treshchev D.V., Ivanova T.B., Naimushina O.S. *Nelineinaya dinamika*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 601-625.
9. Lagoshnaya E.A., Gerasimenko S.V., Bondarenko L.N. *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoj promyshlennosti i transporta*, 2018, no. 1(5), pp. 127-135.
10. Breki A.D., Starikov N.E., Provotorov D.A., Ageev E.V., Gvozdev A.E. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 4(17), pp. 8-12.
11. Loitsyanskii L.G., Lur'e A.I. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Dinamika* (Course of theoretical mechanics. Dynamics), Moscow, Nauka, 1983, vol. II, 640 p.
12. Naryzhnyi V.A. *Dinamika* (Dynamics), Moscow, NIYaU MIFI, 2012, 168 p.
13. Butenin N.V., Lunts Ya.L., Merkin D.R. *Teoreticheskaya mekhanika* (Theoretical mechanics), Saint Petersburg, Lan', 2008, 736 p.
14. Arsen'ev O.N., Gorshkov L.K. *Teoreticheskaya mekhanika* (Theoretical mechanics), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2016, 218 p.

15. Markeev A.P. *Dinamika tela, soprikasayushchegosya s tverdoi poverkhnost'yu* (Dynamics of a body in contact with a solid surface), Moscow, Nauka, 1992, 336 p.
16. Sumbatov A.S., Yunin E.K. *Izbrannye zadachi mekhaniki sistem s sukhim treniem* (Selected mechanical problems of systems with dry friction), Moscow, Fizmatlit, 2013, 194 p.
17. Panev A.S. *Trudy MAI*, 2018,no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90072>
18. Bardin B.S., Panev A.S. *Trudy MAI*, 2015,no. 84. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62995>
19. Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev B.C. *Nelineinaya dinamika*, 2012, no. 8,pp. 289-307.
20. Borisov A.V., Mamaev I.S. *Nelineinaya dinamika*, 2006,vol. 2,pp. 445-452.
21. Zobova A.A., Treshchev D.V. *Trudy matematicheskogo instituta imeni V.A.Steklova*, 2013, vol. 281, pp. 98-126.

Статья поступила в редакцию 02.12.2021; одобрена после рецензирования 28.12.2021; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 02.12.2021; approved after reviewing on 28.12.2021; accepted for publication on 21.02.2022.