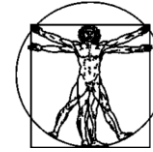


DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.3.02
УДК 531/534:[57+61]



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

СИЛЫ ИНЕРЦИИ В ЗАДАЧАХ БИОМЕХАНИКИ

В.С. Туктамышев, Ю.И. Няшин

Кафедра теоретической механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: helpinvader@list.ru

Аннотация. Как известно, в динамике относительного движения рассматриваются понятия переносной и кориолисовой сил инерции. Эти силы объединяются общим термином «эйлеровы силы инерции». В принципе Даламбера используется величина, равная взятому со знаком «минус» произведению массы материальной точки на ее ускорение в данной системе отсчета. Данная величина обозначается термином «даламберова сила инерции». Зачастую за рамками изучения остается вопрос о существовании сил инерции. Поскольку эйлеровы и даламберова силы инерции не подчиняются третьему закону Ньютона, то эти силы не являются физическими в смысле, принятом в механике. Несмотря на это, математические приемы, используемые в динамике относительного движения и принципе Даламбера, нашли широкое применение в различных областях механики за счет того, что введение сил инерции упрощает описание некоторых механических явлений, наблюдаемых в природе. В частности, с помощью понятия «силы инерции» становится более простым и наглядным решение некоторых проблем биомеханики. Для демонстрации данного утверждения в представленной работе проводится решение двух задач: 1) исследование траектории весенней миграции полярной крачки; 2) исследование кровотока в общей сонной артерии летчика, выполняющего на самолете мертвую петлю.

Ключевые слова: силы инерции, задачи биомеханики, траектории миграций перелетных птиц, кровотоков в сонных артериях.

ВВЕДЕНИЕ

В «Математических началах натуральной философии» с помощью термина «силы инерции» Ньютон обозначал силу, которая возникает при взаимодействии двух тел и действует на ускоряющееся тело со стороны ускоряемого [3]. Позднее в динамике относительного движения этот же термин получил иной смысл, согласно которому при выполнении перехода из инерциальной системы отсчета в неинерциальную к силам, действующим на материальную точку, необходимо добавить переносную и кориолисову силы инерции [5]. Последние объединяются общим понятием «эйлеровы силы инерции» [2]. Еще одно определение «силы инерции» встречается в принципе Даламбера, где под даламберовой силой инерции понимается взятое со знаком «минус» произведение массы точки на ее ускорение в данной системе отсчета. Согласно принципу Даламбера введенная таким образом сила инерции уравнивает силы, действующие на исследуемую материальную точку.

Как известно, согласно классической механике силы возникают в результате механического взаимодействия тел. Эйлеравы силы инерции не подчиняются данному закону, так как не отражают никакого взаимодействия в рассматриваемой системе. Даламберова сила инерции вводится искусственным путем для осуществления формального перехода от уравнений движения к уравнениям статики. Отсюда следует, что ни эйлеравы, ни даламберовы силы инерции нельзя отнести к физическим силам. Несмотря на это, математические приемы, используемые в динамике относительного движения и принципе Даламбера, нашли широкое применение в различных областях механики. Данный факт обусловлен тем, что введение сил инерции упрощает описание некоторых механических явлений, наблюдаемых в природе. В частности, с помощью понятия «силы инерции» становится более простым и наглядным решение некоторых задач биомеханики. Для демонстрации данного утверждения в представленной работе проводится решение двух задач: первая посвящена исследованию траектории весенней миграции полярной крачки; во второй рассматривается течение крови в общей сонной артерии пилота, выполняющего мертвую петлю.

ЭЙЛЕРОВЫ СИЛЫ ИНЕРЦИИ

Как известно, эйлеравы силы инерции вводятся путем подстановки относительного ускорения \mathbf{a}_r , выраженного согласно теореме Кориолиса [5], во второй закон Ньютона:

$$m\mathbf{a}_r = \mathbf{F} + \mathbf{F}_e^{\text{ин}} + \mathbf{F}_c^{\text{ин}}, \quad (1)$$

где m – масса точки; \mathbf{F} – сила, действующая на эту точку; $\mathbf{F}_e^{\text{ин}}$ и $\mathbf{F}_c^{\text{ин}}$ – переносная и кориолисова силы инерции,

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_e^{\text{ин}} &= -m\mathbf{a}_e, \\ \mathbf{F}_c^{\text{ин}} &= -m\mathbf{a}_c, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь \mathbf{a}_e – переносное ускорение точки; \mathbf{a}_c – кориолисово ускорение точки, $\mathbf{a}_c = 2\boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{v}_r$ ($\boldsymbol{\omega}_e$ – угловая скорость вращения подвижной системы отсчета; \mathbf{v}_r – относительная скорость точки).

Соотношение (1) удобно использовать для исследования движения точки по отношению к подвижной системе отсчета. Примером такой системы может служить система отсчета, жестко связанная с Землей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ МИГРАЦИЙ ПЕРЕЛЕТНЫХ ПТИЦ

Одной из интересных задач, которую можно исследовать с помощью динамики относительного движения, является изучение траекторий сезонных миграций перелетных птиц. Орнитологи утверждают, что для перемещения над океанической поверхностью (т.е. при отсутствии ориентиров, имеющих на суше) эти птицы используют чувствительность к магнитному полю планеты [6, 9]. При перелете, например, из южного полушария Земли в северное птицы располагают свое тело вдоль линий магнитного поля в сторону северного полюса. Последние исследования показали, что при весенней миграции полярные крачки (лат. *Sterna paradisaea*), совершая длительный перелет (в несколько десятков тысяч километров) с юга на север, не перемещаются вдоль меридианов [8]. Траектории движения этих птиц относительно Земли представляют собой гигантскую букву «S», простирающуюся над Атлантическим океаном (рис. 1). Данное явление можно объяснить с помощью кориолисовой силы инерции.

Траектория весенней миграции

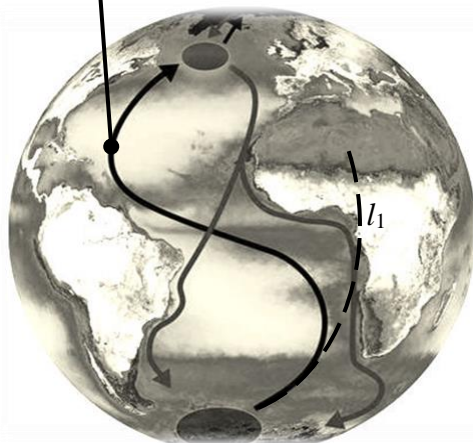


Рис. 1. Траектории миграции полярных крачек [11]. Меридиан, вдоль которого птица начинает свое движение при весенней миграции, соответствует долготе l_1

Предположим, что птица перемещается относительно земной поверхности в южном полушарии со скоростью \mathbf{u} , постоянной по величине и направленной в начальный момент времени по касательной к меридиану l_1 (см. рис. 1) на север. Принимая во внимание вращение Земли вокруг своей оси, определим боковое смещение s птицы при прохождении ею некоторого расстояния d . Движение происходит на широте λ .

Искомое движение птицы заменим движением материальной точки M . Введем систему координат $Oxyz$, начало которой совпадает с начальным положением точки M . Пусть ось Ox направлена по касательной к параллели места на запад, ось Oy – по касательной к меридиану, соответствующему долготе l_1 , на север, ось Oz – к центру Земли (рис. 2). Согласно условию задачи вектор относительной скорости \mathbf{u} в начальный момент времени направлен вдоль оси Oy . Если предположить, что он не изменяет свое направление за время t движения птицы (при прохождении ею расстояния d), то вектор кориолисова ускорения \mathbf{a}_c в течение этого времени будет направлен противоположно оси Ox (по касательной к параллели места на восток), а вектор кориолисовой силы инерции $\mathbf{F}_c^{\text{ин}}$ – на запад (рис. 3, а). Тогда соотношение (1), записанное в проекции на ось Ox , примет вид

$$ma_{rx} = F_c^{\text{ин}}, \quad (3)$$

где, учитывая равенство (2), $F_c^{\text{ин}} = ma_c$.

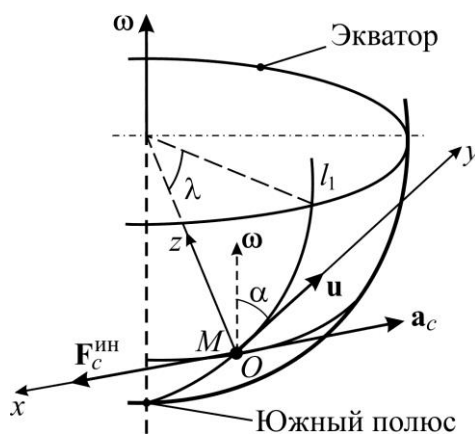


Рис. 2. Начальный момент движения птицы

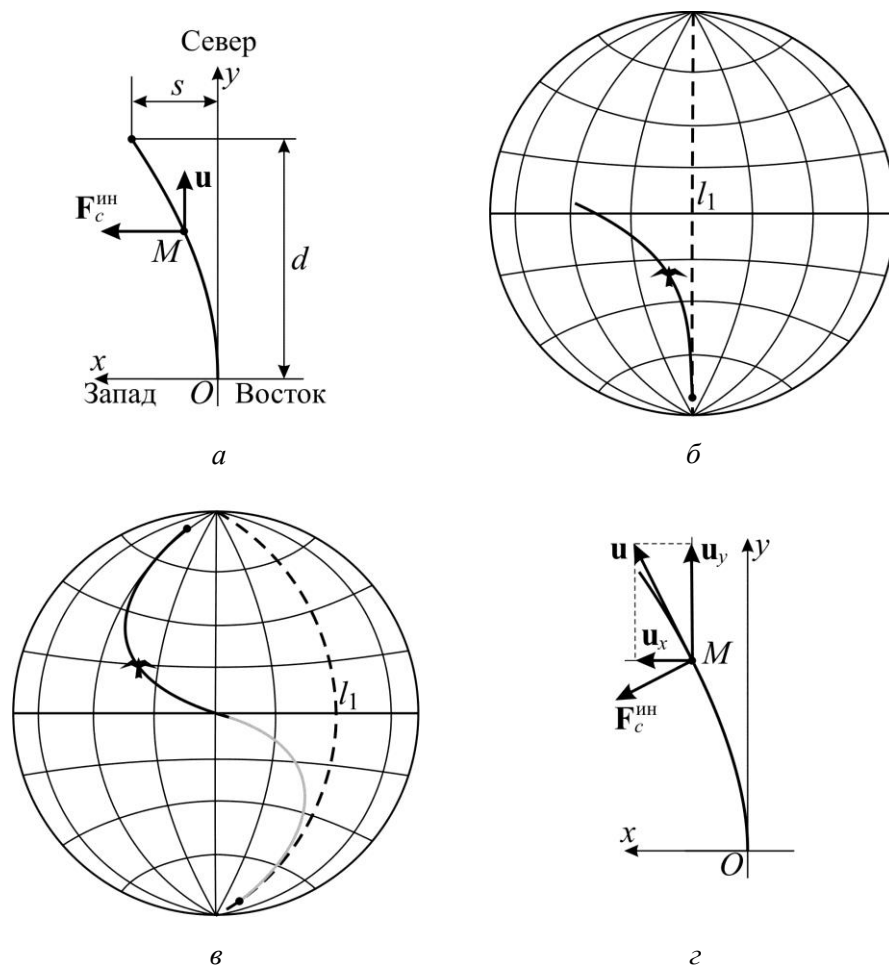


Рис. 3. Схема исследуемого движения: *a* – направления векторов относительной скорости и кориолисовой силы инерции, принятые при решении задачи; *б* – движение птицы в южном полушарии; *в* – движение птицы в северном полушарии; *г* – поворот вектора кориолисовой силы инерции

В рамках рассматриваемого примера величина кориолисова ускорения определяется выражением

$$a_c = 2\omega u \sin\alpha,$$

где ω – угловая скорость вращения Земли; α – угол между векторами ω и u . Отсюда следует, что равенство (3) можно переписать в следующей форме:

$$\ddot{x} = 2\omega u \sin\alpha.$$

Пренебрегая изменением угла α за время перемещения на заданное расстояние и считая скорость u постоянной по величине, получаем решение дифференциального уравнения

$$x = \omega u t^2 \sin\alpha.$$

Выразим искомое смещение s :

$$s = \omega \frac{d^2}{u} \sin\alpha.$$

Очевидно, что $\alpha = \lambda$, поэтому

$$s = \omega \frac{d^2}{u} \sin\lambda. \tag{4}$$

Если предположить, что птица перемещается со скоростью 50 км/ч на широте $\lambda = 30^\circ$, то согласно последней формуле боковое смещение s через 50 км пути будет составлять примерно 6,5 км. Соотношение (4) показывает, что боковое смещение становится значительным при большой дальности перелета. При этом в южном полушарии отклонение будет происходить влево от направления движения (см. рис. 3, б). Движение птицы в северном полушарии сопровождается смещением вправо от направления ее движения, поскольку вектор кориолисовой силы инерции будет менять свое направление в соответствующую сторону (см. рис. 3, в). Таким образом, представленные рассуждения объясняют траекторию движения полярных крачек, обозначенную на рис. 1.

Как было указано ранее, при проведении вычислений предполагалось, что вектор относительной скорости направлен параллельно оси y ($\mathbf{u} = \mathbf{u}_y$). Однако смещение точки M в сторону положительного направления оси Ox определяет ненулевую компоненту \mathbf{u}_x . Поэтому направление вектора относительной скорости \mathbf{u} не является постоянным, что объясняет изменение направления вектора кориолисовой силы инерции (см. рис. 3, г). В то же время можно показать, что при перелете на сравнительно небольшое расстояние, принятое в задаче ($d = 50$ км), значение \mathbf{u}_x мало по сравнению с величиной \mathbf{u}_y , т.е. в первом приближении поворотом вектора $\mathbf{F}_c^{\text{ин}}$ можно пренебречь. Если учесть, что полярные крачки способны пролетать десятки тысяч километров без посадок, то боковое отклонение s составит сотни километров, т.е. изменение направления вектора относительной скорости станет существенным. Поэтому при количественном анализе подобных длительных перелетов поворотом вектора кориолисовой силы инерции пренебрегать нельзя.

Как было отмечено ранее, кориолисова сила инерции является фиктивной, т.е. не относится к силам физическим. Поэтому следует понимать, что сила инерции не оказывает никакого физического влияния на птицу. В действительности подобная траектория является результатом движения птицы в неинерциальной системе отсчета, связанной с вращающейся Землей. Такой вывод можно пояснить с помощью следующих соображений. Предположим, что крачка начинает свой перелет с южного полюса и двигается на север. В начальный момент времени t_0 она находится на оси вращения планеты, т.е. никакой скорости, обусловленной вращением Земли, птица в этот момент не получит. Кроме того, перемещаясь в атмосфере, крачка не взаимодействует с земной поверхностью. Таким образом, если наблюдать рассматриваемый полет с точки зрения неподвижной (инерциальной) системы отсчета, то движение птицы будет происходить вдоль некоторой неподвижной (относительно данной системы) линии m без какого-либо бокового смещения (рис. 4, а).

В то же время по отношению к земной поверхности исследуемая траектория будет иметь более сложную форму, так как Земля постоянно поворачивается под линией m . В некоторый момент времени t_1 птица переместится вдоль долготы l_1 из начальной точки M_0 в новое положение, которое находится над точкой M_1 земной поверхности (см. рис. 4, б). В следующий момент времени (t_2) положение птицы на траектории (обозначено точкой M на рис. 4, в) будет соответствовать точке M_2 земной поверхности. При этом за счет вращения Земли данная точка будет находиться на долготе l_2 (см. рис. 4, в). В момент времени t_3 крачка окажется над точкой M_3 на долготе l_3 (см. рис. 4, г). Аналогичные рассуждения можно провести для дальнейшего движения птицы по линии m . На рис. 5 показаны точки земной поверхности, которые соответствуют перемещению птицы вдоль этой линии. По этим точкам можно восстановить кривую, идентичную траектории, изображенной на рис. 1.

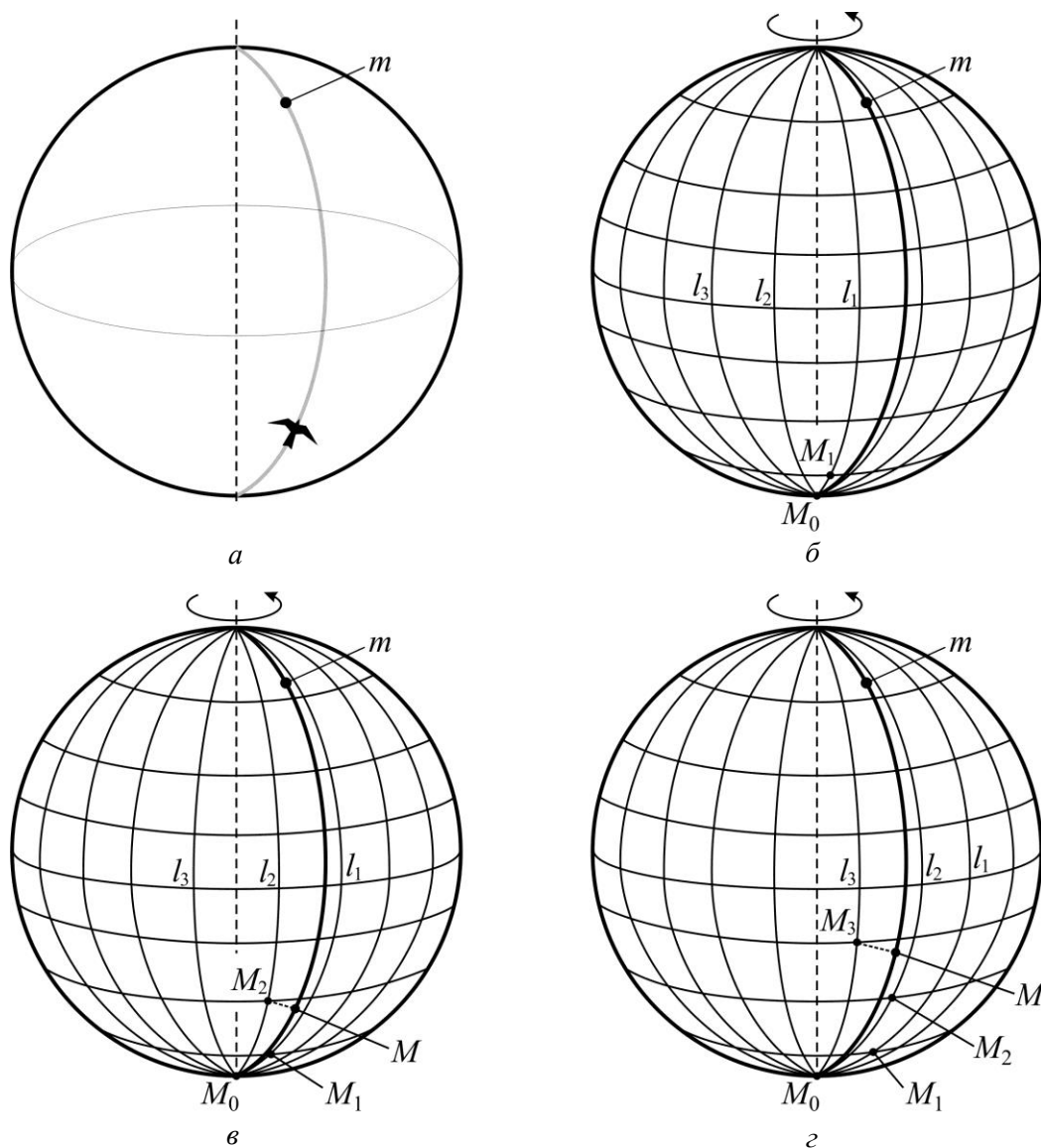


Рис. 4. Движение полярной крачки по отношению к земной поверхности: *a* – траектория полета вдоль неподвижной (относительно инерциальной системы отсчета) линии *m*; *б*, *в* и *г* – положения птицы в моменты времени t_1 , t_2 и t_3

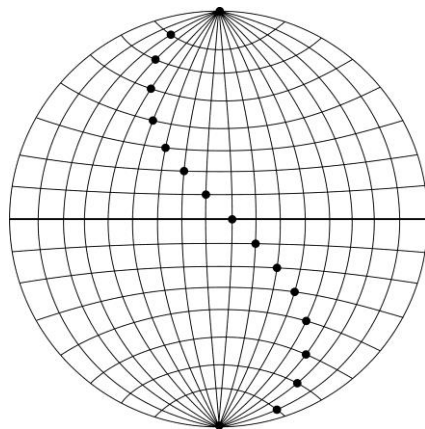


Рис. 5. Точки земной поверхности, соответствующие движению вдоль линии *m*

Приведенные рассуждения показывают сложность объяснения подобных эффектов в рамках инерциальной системы отсчета. Вместе с тем, как было показано ранее, введение кориолисовой силы инерции позволяет достаточно кратко и наглядно изложить решение представленной задачи.

ДАЛАМБЕРОВА СИЛА ИНЕРЦИИ

Ранее было отмечено, что даламберова сила инерции $\mathbf{F}^{\text{ин}}$ определяется взятым со знаком «минус» произведением массы m точки на ее абсолютное ускорение \mathbf{a} :

$$\mathbf{F}^{\text{ин}} = -m\mathbf{a}. \quad (5)$$

В соответствии с этим из второго закона Ньютона получаем уравнение

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}^{\text{ин}} = 0, \quad (6)$$

где \mathbf{F} – сила, действующая на точку. Из формулы (6) следует принцип Даламбера для материальной точки: если к силе, приложенной к материальной точке, прибавить даламберову силу инерции, то полученная система сил будет уравновешенной. Таким образом, данный принцип позволяет упростить решение некоторых задач динамики путем сведения их к соответствующим задачам статики.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРОВОТОКА В ОБЩЕЙ СОННОЙ АРТЕРИИ ЛЕТЧИКА, ВЫПОЛНЯЮЩЕГО МЕРТВУЮ ПЕТЛЮ

Рассмотрим движение тела пилота самолета при выполнении им мертвой петли. Исследуем кровоток в общей сонной артерии летчика во время выполнения данного маневра.

Из анатомии человека известно, что общая сонная артерия с ее ветвями – наружной и внутренней – доставляет кровь от дуги аорты к голове [4]. Общих сонных артерий две: правая и левая. Каждый из этих сосудов поднимается вверх вдоль соответствующей стороны шеи и на уровне щитовидной железы делится на внутреннюю и наружную сонные артерии (рис. 6).

Для упрощения решения задачи предположим, что в рассматриваемый промежуток времени движение крови по сосуду представляет собой установившееся ламинарное одномерное течение, т.е. течение Пуазейля в круглой трубе под действием градиента давления. Распределение скоростей при этом подчиняется следующей закономерности [1]:

$$v(r) = \frac{R^2 - r^2}{4\eta} \frac{\Delta p}{L},$$

где R – радиус трубы (сосуда); r – расстояние от оси; η – вязкость крови; Δp – перепад давления между началом и концом сосуда, $\Delta p = p_1 - p_2$; L – длина сосуда (рис. 7). Согласно последнему соотношению максимальная скорость достигается на оси сосуда (при $r = 0$):

$$v_0 = v(r=0) = \frac{R^2}{4\eta} \frac{\Delta p}{L}.$$

Если тело человека находится в вертикальном положении, необходимо принять во внимание силу тяжести, действующую вдоль оси сосуда [1]:

$$v(r) = \frac{R^2 - r^2}{4\eta} \left(\frac{\Delta p}{L} - \rho g \right), \quad v_0 = \frac{R^2}{4\eta} \left(\frac{\Delta p}{L} - \rho g \right), \quad (7)$$

где ρ – плотность крови; g – ускорение свободного падения.

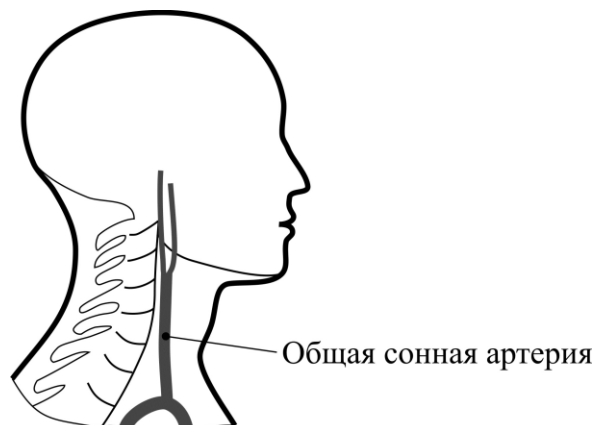


Рис. 6. Схематическое изображение правой общей сонной артерии

Для экспериментальных данных, полученных в работе [7], характерны следующие значения рассматриваемых параметров: диаметр общей сонной артерии $2R \approx 6$ мм, длина артерии $L \approx 10$ см, вязкость крови $\eta \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность крови $\rho \approx 1050$ кг/м³, скорость кровотока во время систолы $v_0 \approx 100$ см/с.

Согласно соотношению (7) приведенным значениям соответствует перепад давления

$$\Delta p = \left(\frac{4\eta v_0}{R^2} + \rho g \right) L \approx 1250 \text{ (Па)} \approx 10 \text{ (мм рт. ст.)}.$$

Предположим, что самолет перемещается относительно поверхности Земли со скоростью, имеющей постоянное значение u , двигаясь при этом по окружности радиуса R_1 . Если значение радиуса R_1 будет достаточно большим, то тело пилота можно моделировать материальной точкой. Осуществим мысленный переход от состояния движения самолета к состоянию его покоя в положении, соответствующем входу в петлю (выходу из петли). На рис. 8 данное положение обозначено точкой А. При выполнении такого перехода в соответствии с принципом Даламбера к силе тяжести mg , действующей на рассматриваемую точку, необходимо добавить силу инерции $F^{ин}$ (см. рис. 8), величина которой определяется равенством (5)

$$F^{ин} = ma.$$

По аналогии с силой тяжести даламберова сила инерции относится к массовым силам. Таким образом, для положения А, в котором приложенные к точке силы направлены от центра окружности, справедлива следующая форма записи выражения (7):

$$v_0 = \frac{R^2}{4\eta} \left(\frac{\Delta p}{L} - \rho(g + a_e) \right).$$

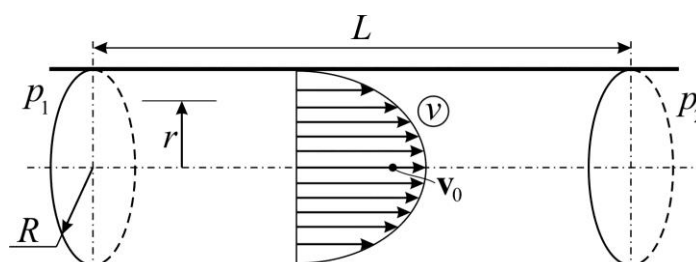


Рис. 7. Течение Пуазейля в горизонтальной круглой трубе

Поскольку величина u скорости самолета является постоянной, значение абсолютного ускорения точки будет определяться только его центростремительной составляющей:

$$a = a_n = u^2/R_1.$$

Отметим, что сила инерции $\mathbf{F}^{\text{ин}} = -m\mathbf{a}_n$, определяемая центростремительным ускорением, называется центробежной силой инерции, а отношение величины этой силы к весу пилота – перегрузкой [2].

Учитывая последнюю формулу, получим

$$v_0 = \frac{R^2}{4\eta} \left(\frac{\Delta p}{L} - \rho \left(g + \frac{u^2}{R_1} \right) \right). \quad (8)$$

Из формулы (8) можно определить значение скорости u , при котором нарушается кровотоки в общей сонной артерии. Исходя из данных, приведенных в работе [10], течение крови в этом сосуде является экстремально медленным при скорости 15 см/с. Обозначим это значение символом « v_{ext} ». Тогда

$$u = \sqrt{R_1 \left(\left(\frac{\Delta p}{\rho L} - \frac{4v_{\text{ext}}\eta}{\rho R^2} \right) - g \right)},$$

где Δp – найденный ранее перепад давления в сосуде. Допустим, что радиус мертвой петли R_1 составляет 200 м. При этом согласно последней формуле

$$u \approx 19 \text{ м/с}.$$

Отсюда следует, что в условиях, принятых при решении представленного примера, скорость кровотока в общей сонной артерии летчика становится экстремально низкой при скорости самолета, примерно равной 19 м/с. Для быстрого восстановления нормального течения крови в сонных артериях в организме летчика повышается артериальное давление благодаря усиленным сокращениям миокарда. Это позволяет развивать на самолете более высокие скорости, необходимые для выполнения мертвой петли. Однако, несмотря на наличие компенсаторных механизмов, при действии длительных перегрузок уменьшение притока крови к головному мозгу неизбежно, в результате чего развиваются патологические состояния, такие как головокружение, помутнение зрения и даже потеря сознания.

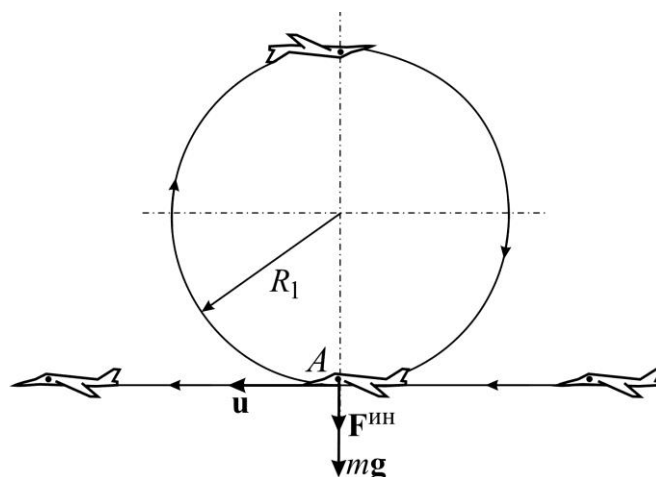
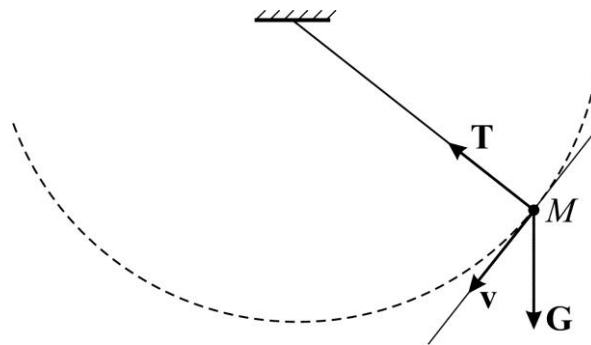


Рис. 8. Силы, приложенные к рассматриваемой материальной точке в различных положениях самолета при выполнении мертвой петли

Рис. 9. Математический маятник: G – сила тяжести

Так же, как и в предыдущем примере, введенная сила инерции является фиктивной и не может воздействовать на кровоток. Уменьшение его скорости связано с вращательным движением системы отсчета, в которой находится тело человека. Для того чтобы понять данное утверждение, обратимся к аналогии, изображенной на рис. 9. На данном рисунке показан математический маятник (материальная точка M , подвешенная на нерастяжимой нити). При его движении сила T натяжения нити, постоянно направленная к оси подвеса, способствует повороту вектора скорости точки, в результате чего она перемещается по дуге окружности. Вместе с тем согласно первому закону Ньютона материальная точка стремится к равномерному движению вдоль прямой, на которой в данный момент времени лежит вектор v ее скорости (см. рис. 9). Иными словами, точка M пытается препятствовать изменению направления своего движения, что объясняет ее стремление к удалению от оси вращения.

Подобным образом будет двигаться произвольная частица крови в рамках представленной задачи, т.е. перемещение частицы вдоль артерии к голове пилота будет сопровождаться ее стремлением к удалению от центра окружности, изображенной на рис. 8. При достаточно большой скорости самолета влияние описываемого эффекта будет значительным, что приведет к уменьшению скорости кровотока до экстремально низких значений.

Выводы

В представленной работе рассмотрены две задачи, в одной из которых посредством введения кориолисовой силы инерции осуществляется попытка объяснения формы траектории весенней миграции полярной крачки. Во второй задаче с помощью понятия даламберовой силы инерции исследуется условие уменьшения скорости кровотока в общей сонной артерии пилота, выполняющего на самолете мертвую петлю. Представленные в данной работе примеры наглядно демонстрируют необходимость введения эйлеровых и даламберовой сил инерции для упрощения описания сложных явлений, исследуемых в подобных задачах биомеханики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы, факты, подобие. – М.: Иностранная литература, 1963. – 244 с.
2. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
3. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989. – 690 с.
4. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека: в 3 т. – М.: Медгиз, 1963. – Т. 1. – 477 с.
5. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1995. – 416 с.
6. Beason R.C., Dussourd N., Deutschlander M.E. Behavioural evidence for the use of magnetic material in magnetoreception by a migratory bird // *The Journal of Experimental Biology*. – 1995. – Vol. 198, № 1. – P. 141–146.
7. Bluth E.I., Mevay L.V., Merritt C.R.B. The identification of ulcerative plaque with high-resolution duplex carotid scanning // *Journal of Ultrasound in Medicine*. – 1988. – Vol. 7. – P. 73–76.

8. Egevang C., Stenhouse I.J., Phillips R.A., Petersen A., Fox J.W., Silk J.R.D. Tracking of Arctic terns *Sterna paradisaea* reveals longest animal migration // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2010. – Vol. 107, № 5. – P. 2078–2081.
9. Henshaw I., Fransson T., Jakobsson S., Kullberg C. Geomagnetic field affects spring migratory direction in a long distance migrant // *Behavioral Ecology and Sociobiology*. – 2010. – Vol. 64, № 8. – P. 1317–1323.
10. Modin A.Yu. Effect of gravity on blood distribution and flow in large vessels of healthy humans // *Human Physiology*. – 2003. – Vol. 29, № 5. – P. 556–560.
11. The Arctic tern migration project [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.arctictern.info> (дата обращения: 31.08.2016).

INERTIA FORCES IN PROBLEMS OF BIOMECHANICS

V.S. Tuktamyshev, Y.I. Nyashin (Perm, Russia)

As is known, the dynamics of relative motion deals with the notions guiding inertia force and Coriolis inertia force. These forces are combined under the generic term "Eulerian inertia forces". In d'Alembert's principle, there is used a quantity which is equal to multiplication of the mass of the material point taken with a sign "minus" to its acceleration in the frame of reference. Question of the existence of inertia forces often remains outside study. Since Eulerian and D'Alembert's inertia forces do not obey Newton's third law, these forces are not physical in the sense accepted in mechanics. Despite this, the mathematical techniques used in the dynamics of the relative motion and the d'Alembert principle, are widely used in various fields of mechanics due to the fact that the introduction of the inertia forces simplifies the description of some mechanical phenomena observed in nature. In particular, the solution of some problems of biomechanics becomes simpler and more visible with the "inertia forces" notion. To demonstrate this assertion, this study presents the solution of two problems: 1) study of the trajectory of the spring migration of Arctic tern; 2) study of blood flow in the common carotid artery of a pilot performing dead loop on a plane.

Key words: inertia forces, problems of biomechanics, flight trajectory of migratory birds, blood flow in carotid arteries.

Получено 05 сентября 2016