

О понятии "масса" в ньютоновой и релятивистской механике

Содержание

1. Путаница в терминологии, относящейся к массе.
2. Килограмм является единицей именно гравитационной массы.
3. Что подразумевается сейчас под "инертной массой".
4. Должно ли существовать вообще понятие "инертная масса"?
5. Проверка предложений об устранении "инертной массы" анализом размерностей.
6. В итоге масса – это мера чего?
7. Необходимо ли понятие "масса" в релятивистской механике?

1. Путаница в терминологии, относящейся к массе

К термину “масса“ в современной физике имеется много дополняющих прилагательных (инертная масса, гравитационная масса, электромагнитная масса, динамическая масса, релятивистская масса, масса покоя, продольная и поперечная массы, активная и пассивная массы). Почти все они подробно проанализированы в монографии М. Джеммера [1] и через 27 лет с учетом состояния физики к концу XX века в статье Л.Б.Окуня [2]. Но в справочниках и стандартах до сих пор существует неопределенность в отношении термина “масса“.

Согласно справочнику по физике [3] масса является “*мерой инертности материальной точки*“. В метрологическом справочнике [4] сказано, что масса является “*мерой инертности и гравитации любого материального объекта*“. Из этого определения следует, что массу необходимо считать и мерой инертности при прямолинейном движении, и зарядом гравитационного поля. Но в словарной статье БСЭ о массе говорится: “*В принципе ниоткуда не следует, что масса, создающая поле тяготения, определяет и инерцию того же тела*“. В то же время в Физической энциклопедии [5] подчеркнуто, что “*речь идет не о равенстве двух различных масс, а об одной и той же физической величине – массе, определяющей различные явления*“.

В современной метрологии измерительным эталоном массы является устройство, в котором массу измеряют взвешиванием. Это международный прототип килограмма [4], утвержденный в 1901 году. Да и сам килограмм первоначально был введен в 1799 году как единица веса. То есть метрологи измеряют лишь гравитационную массу тел.

В статье Л.Окуня [2] разъясняется, что все названия массы, кроме двух (гравитационная и инертная), возникли на рубеже XIX и XX веков, когда от ньютоновой механики и принципа относительности Галилея (при скоростях тел $v \ll c$) физика стала переходить к релятивистской механике и принципу относительности Эйнштейна (при значениях v , близких к c). Автор показывает, как исторически “*... на границе столетий из-за, как мы теперь понимаем, незаконного использования нерелятивистских формул для описания релятивистских объектов, возникло семейство «масс», растущих с энергией тела*“. Отсюда делается вывод: исторически возникшее “*семейство масс*“ релятивистской механики должно уйти в историю физики и не влиять на определение массы. То же самое можно сказать и о не существующей “*динамической массе*“, то есть о массе, изменяющейся со скоростью [6]. У Л.Окуня: “*масса тела в ньютоновой механике и масса того же тела в релятивистской механике – это одна и та же величина*“.

Гравитационную массу в ньютоновой механике иногда подразделяют на “активную массу” и “пассивную массу”. Но это указывает лишь на характер взаимодействия масс в гравитационном поле. Активная масса поле создает, а пассивная масса вносится в уже существующее поле. Так что принципиальное различие между активной и пассивной массами отсутствует [1].

В связи с определением массы в справочнике [4] необходимо указать на метрологическое различие между величинами “инертная масса” и “гравитационная масса”, потому что размерности инертной массы и гравитационной массы определяются из разных уравнений (первая – из второго закона Ньютона, вторая – из закона всемирного тяготения Ньютона). При различном подборе комплекта основных физических величин размерности указанных масс оказываются разными.

И еще несколько слов о понятиях "продольная масса" и "поперечная масса". Слова "продольная" и "поперечная" указывают на то, что масса элементарной частицы определяется энергией движения либо в плоскости, в которой лежит вектор ее продольной скорости, либо в перпендикулярной ей плоскости. Фактически же речь идет об энергии прямолинейного движения частицы и об энергии вращения частицы вокруг собственной оси, направление которой совпадает с вектором скорости. Поэтому понятие "поперечная масса" должно быть заменено понятием "момент инерции" частицы, поскольку речь идет уже о вращательном, а не о прямолинейном движении.

2. Килограмм является единицей именно гравитационной массы

Применяемая в **СИ** единица массы килограмм определяется с учетом ускорения свободного падения в той точке гравитационного поля Земли, где расположен прототип килограмма. Это конкретно свидетельствует о том, что единица килограмм является в СИ единицей гравитационной массы. Гравитационная масса – это заряд гравитационного поля, и ни от каких сторонних воздействий на физическую систему, находящуюся в этом поле, она не зависит. Но в метрологии до сих пор считается, что единица гравитационной массы килограмм является в **СИ** также и единицей инертной массы, потому что в условиях Земли и при скоростях $v \ll c$ принцип эквивалентности масс соблюдается.

На принципе эквивалентности масс базируется так называемая ЛТ-система размерностей [7], сторонники которой возражают против того, чтобы у гравитационной и инертной масс были разные размерности. В статье [7] показано, что принцип эквивалентности масс оправдывается в ньютоновой механике только численно, но не метрологически.

Ссылки на то, что эксперименты, проведенные в земных условиях, доказывают, что точность соблюдения численного равенства гравитационной и инертной масс доведена до 10^{-12} , еще не доказывают релевантность принципа эквивалентности масс в релятивистской механике, где $v \rightarrow c$. Численное равенство в макромире действительно имеется, и для доказательства этого нет необходимости проводить эксперименты на дорогостоящих установках с такой высокой точностью. Просто надо выяснить, существует ли вообще "инертная масса".

3. Что подразумевается сейчас под "инертной массой"

Далее в этой статье мы будем применять разные обозначения для гравитационной и инертной масс: m и m_{in} . “Инертная масса” m_{in} присутствует сейчас во втором законе Ньютона в записи

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m_{in} . (1)$$

Подчеркнем, что подобная запись второго закона Ньютона может быть применена лишь для механической прямолинейной формы движения, в которой инертная масса m_{in} присутствует в качестве конструктивного параметра системы.

Второй закон Ньютона часто называют уравнением динамики, но это не совсем верно. Это частный случай обобщенного уравнения динамики системы в записи

$$D \Delta q + R dq/dt + I d^2q/dt^2 = - \Delta U, (2)$$

где ΔU – обобщенная разность потенциалов; q – обобщенная координата состояния системы; D – жесткость системы; R – диссипативное сопротивление системы; I – инертность системы. Так что второй закон Ньютона является частным случаем этого уравнения и то лишь для прямолинейной формы движения, для которой уравнение (2) записывается в виде:

$$D \Delta x + R dx/dt + m_{in} d^2x/dt^2 = - F, (3)$$

где F – сила, действующая на систему; x – линейное перемещение; D – жесткость механической системы; R – сопротивление трения. А “инертная масса“ m_{in} соответствует линейной инертности I из уравнения (2) при прямолинейном движении.

Второй закон Ньютона ограничивается только третьим слагаемым левой части уравнения (3). На самом деле действующая на тело сторонняя сила F равна по модулю сумме трех противодействующих сил: силы упругого противодействия, силы трения и силы инерции. А во втором законе Ньютона в записи (1) сторонняя сила F равна по модулю только силе инерции ($m_{in} d^2x/dt^2$), остальные две противодействующие силы не учитываются.

Добавим справедливые замечания Л.Окуня [2]: “Если попытаться определить как “инертную массу“ отношение силы к ускорению, то эта величина в теории относительности зависит от взаимного направления силы и скорости, и потому однозначным образом ее определить нельзя. К такому же заключению относительно «гравитационной массы» приводит рассмотрение гравитационного взаимодействия“. И еще: “Масса релятивистски движущегося тела не является мерой его инертности“.

4. Должно ли существовать вообще понятие "инертная масса"?

Проанализируем два разных ответа на этот вопрос в статьях [8] и [6], сохранив авторские обозначения в приводимых формулах. В статье [8] приводится мысленный эксперимент, на основании которого второй закон Ньютона представлен в такой записи:

$$a = F/m_0 nV, (4)$$

где $m_0 = m/N$, m – гравитационная масса однородного макроскопического тела, N – число структурных элементов тела, m_0 – гравитационная масса одного структурного элемента тела, $n = N/V$ – концентрация структурных элементов, из которых состоит тело, а V – объем тела. Автор [8] пишет: “масса структурного элемента (масса атома или молекулы) по своей сути является гравитационной массой“. Он включает ее во второй закон Ньютона в записи (4) и приходит к выводу: “Таким образом, для количественной характеристики инерционных свойств однородного макротела не нужно вводить понятие инертной массы“.

В статье [6] обращено внимание на то, что вместо общепринятой в физике записи второго закона Ньютона в виде $dp/dt = F$, где p – импульс тела, “в общем случае релятивистских скоростей второй закон Ньютона должен записываться в форме:

$$\mathbf{F}_a = R_a \, d\mathbf{p}/dt \quad (5)$$

Нелинейный феноменологический коэффициент R_a , введенный в уравнение (5) “характеризует «инерционность» системы по отношению к ускоряющей силе \mathbf{F}_a . Сопоставляя уравнение (5) со 2-м законом Ньютона в записи $d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}$, находим, что в нем единицы измерения физических величин выбраны таким образом, чтобы коэффициент R_a был равен единице, и в случае его постоянства просто мог быть опущен“. Вот ход дальнейших рассуждений в статье [6]. При приближении скорости тела v к скорости света c , никакая внешняя сила \mathbf{F}_a не может вызвать рост ускорения тела, то есть $d\mathbf{p}/dt \rightarrow 0$. При этом, как следует из уравнения (5), коэффициент R_a стремится возрасти до бесконечности. Это и наблюдается в ускорителях элементарных частиц, что в СТО ошибочно приписывается возрастанию массы.

Далее в статье [6] указывается на то, что гравитационная масса m , играющая в выражении $(m\mathbf{v})$ роль меры количества вещества, не имеет никакого отношения к коэффициенту R_a как мере его инертности. Гравитационная масса m является функцией состояния, в то время как R_a – функцией процесса (его скорости \mathbf{v}). И делается вывод: “Как видим, подход к механике с более общих позиций энергодинамики позволяет обнаружить в законе Ньютона $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$ отсутствие коэффициента R_a , характеризующего сопротивление системы процессу ускорения. Это привело к тому, что массе стали приписывать смысл экстенсивной меры инертности (mR_a) . В последующем это сделало незаметной подмену в СТО массы m как функции состояния инертной массой m_{in} как функцией процесса, что заведомо некорректно“.

Иными словами, с возрастанием скорости \mathbf{v} изменяется не гравитационная масса m , играющая в выражении $(m\mathbf{v})$ в соответствии с определением, данным ей И.Ньютоном, роль меры количества вещества, а изменяется феноменологический коэффициент R_a , являющийся мерой инертных свойств тела. Последнее означает, что трактовка массы во втором законе Ньютона как меры инертных свойств тела основана на подмене гравитационной массы m инертной массой m_{in} , равной

$$m_{in} = (R_a m) \quad (6)$$

Уравнение (6) нелинейно, и в статье [6] сказано, что “частным случаем этой нелинейности является зависимость коэффициента R_a от скорости \mathbf{v} (или импульса \mathbf{p}), не известная механике“. Зависимость (6), по утверждению В.Эткина, “не требует привлечения принципа относительности Пуанкаре-Лоренца-Эйнштейна и вытекающего из него преобразования Лоренца, для которых $R_a = \gamma$, где $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ – множитель Лоренца. С позиций феноменологической теории необратимых процессов и энергодинамики такая зависимость устанавливается опытным путем... Характер зависимости $R_a = R_a(\mathbf{v})$ в этом случае может отличаться от множителя Лоренца γ “.

В заключение в статье [6] делается вывод: ...существует единственная масса m , являющаяся мерой количества вещества, а понятия “массы покоя”, “релятивистской”, “инертной”, “электромагнитной”, “гравитационной” и т.п. масс должны быть отброшены как излишние“.

5. Проверка предложений об устранении понятия “инертная масса” анализом размерностей

В статье [8] в знаменателе уравнения (4) записано выражение $(m_0 n V)$, имеющее в СИ размерность массы. При этом концентрация n в уравнении (4) должна иметь в СИ оригинальную размерность L^{-3} и оригинальную единицу m^{-3} (обратный кубометр). Подобная “оригинальность“ исчезает, если в число основных величин ввести число

структурных элементов однородной системы [9] с размерностью N и единицей штука. Правило размерностей в знаменателе уравнения (4) легко соблюдается при единице кг/штука для массы m_0 одного структурного элемента, и при единице штука/ m^3 – для концентрации n .

В статье [6] в уравнениях (5) и (6) размерность коэффициента R_a зависит от комплекта основных величин в той системе единиц, которая применяется для анализа размерностей. В частности, при применении **СИ** коэффициент $R_a = m_{in} / m$ имеет размерность, равную 1, так как в **СИ** нет различия между размерностями инертной и гравитационной масс. Согласно же уравнению (6) R_a должен иметь собственную размерность, если считать, что “инертная масса” m_{in} не то же самое, что гравитационная масса m . И эта размерность должна остаться у R_a и в том случае, когда его численное значение будет равно 1, то есть в ньютоновой механике.

6. В итоге масса – это мера чего?

Если отбросить все дополняющие прилагательные к термину “масса”, как это предлагают Л.Окунь и В.Эткин, то каждый будет волен понимать под термином “масса” то, что ему захочется. Например, в статье [8], подразумевается, что масса – это мера гравитации, а в статье [6], – что это мера количества вещества. По поводу последнего заметим, что в **СИ** единицей физической величины, называемой “количество вещества”, является моль, а не килограмм. Поэтому нельзя говорить, что масса играет роль меры количества вещества, пока не внесено соответствующее изменение в **СИ**.

Но такое утверждение бытует в физике со времен И.Ньютона, поскольку понятие “количество вещества” вплоть до начала XX века идентифицировалось с понятием “количество материи”. Это исторически связано с цитатой из трактата И.Ньютона “Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее”, и с подтверждающей эту цитату теоремой Л.Эйлера “Сила инерции в любом теле пропорциональна количеству материи, которое содержит тело” (цитаты взяты из монографии [1]). В комментариях к этой монографии приведено важное разъяснение: “Классическое понятие массы в смысле количества материи сохраняет свое значение для вещества, т. е. для частиц, обладающих собственной массой, и имеет силу лишь для определенных условий движения этих частиц (сравнительно малые скорости их движения) и соответствующих макроскопических тел. Но оно теряет свою силу в качестве общего понятия”.

Анализ понятия “масса”, приведенный в данной статье, говорит о том, что масса должна считаться только мерой гравитации в ньютоновой механике. Это полезно было бы закрепить стандартом.

В XX веке в связи с приобретшим важное значение понятия “дефект массы” укрепилось мнение, что “масса может выступать как мера освобожденной или поглощенной энергии” [1]. Еще в 1905 г. А.Эйнштейн приходит к выводу: “Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии”. Существует даже предложение рассматривать величину под названием “массэргия” [1]. В статье Л.Окуня [2] также сказано: “...масса частицы является мерой энергии, «спящей» в покоящейся частице, мерой энергии покоя”. Энергия входит в качестве основной величины в основные единицы планковской естественной системы единиц.

Сказанное приводит к выводу, что в естественных системах величин, так же, как и в естественных системах единиц, масса в качестве основной величины должна быть заменена энергией. Именно подобная замена, описанная в статье [11], позволила ее автору провести систематизацию физических величин. Однако авторы планируемого переопределения основных единиц **СИ** ничего в этом плане менять не собираются [12], мотивируя это тем, что для практической метрологии и для практической физики это

было бы слишком непривычным, психологически и экономически неоправданным мероприятием.

7. Необходимо ли понятие "масса" в релятивистской механике?

В статье Л.Окуня [2, §11, п.7] сказано: “Масса элементарной частицы является одной из ее важнейших характеристик. Ее стараются измерить с наилучшей точностью“. И абзацем выше: “Согласно теории относительности масса частицы является мерой энергии, «спящей» в покоящейся частице, мерой энергии покоя: $E_0=mc^2$ “.

К этим словам можно добавить свидетельство из работы [10] о том, что в качестве фундаментальной физической константы в естественных системах физических величин стали в последнее время вместо массы электрона m_e применять энергетические величины, одной из которых является планковская единица энергии. Наконец, широко известно, что в релятивистской механике массы элементарных частиц измеряют не в килограммах, а в электрон-Вольтах, а электрон-Вольт - это единица энергии.

Так не следует ли вместо неизвестно какой массы считать важнейшей характеристикой элементарных частиц их энергию покоя E_0 ? А массу считать всего лишь размерным коэффициентом пропорциональности между энергией покоя и квадратом скорости света.

В том же §11, но в п.2, сказано: “В релятивистской теории, когда энергии частиц очень велики по сравнению с их массами, масса системы частиц определяется не только и не столько их числом, сколько их энергиями и взаимной ориентацией импульсов“. Таким образом, для системы частиц важнейшими характеристиками являются энергия, импульс, момент импульса и число частиц. А для конкретной элементарной частицы важнейшими характеристиками являются ее энергия покоя, определяющая частицу количественно, импульс, определяющий направление движения частицы, и момент импульса, определяющий направление вращения. И тогда масса, как физическая величина, оказывается в релятивистской механике излишней.

Главные выводы

1. Второй закон Ньютона в записи $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ является в макромире лишь частным случаем обобщенного уравнения динамики.

2. Эксперименты по доказательству принципа эквивалентности масс в макромире оказались излишней тратой времени и средств ввиду отсутствия инертной массы как таковой.

3. Термин "поперечная масса" не корректен, поскольку в той плоскости, в которой эта масса частицы определяется, речь идет о собственном вращении частицы, а не о ее прямолинейном движении (то есть там не масса, а момент инерции).

4. В релятивистской механике количественной характеристикой элементарной частицы следует считать энергию покоя, а не массу.

Литература

1. M. Jammer, 1961, Concepts of mass in classical and modern physics. Harvard University press. Ambridge-Massachusetts, (М. Джеммер, 1967, Понятие массы в классической и современной физике. Перевод и комментарии Н. Ф. Овчинникова. М.: Изд. «Прогресс». – 255 с.)
2. Окунь Л.Б., 1989, Понятие массы (Масса, энергия, относительность). – М.: ”Успехи физических наук”, т. 158, вып.3, с.с.511-530
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А., 1990, Справочник по физике. 3-е изд. М.: Наука, Физматгиз, 624 с.
4. Чертов А.Г., 1990, Физические величины. – М.: Высшая школа, 336 с.
5. Физическая энциклопедия. Т.3.– 1992. – М.: Большая Российская Энциклопедия – 672 с.
6. Эткин В.А., 2011, Изменяется ли масса со скоростью? –

<http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/10904.html>

7. Коган И.Ш., 2012, Система величин на основе длины L и времени T : Pro et Contra. – Законодательная и прикладная метрология, 3, с.с. 50-57.
8. Трунов Г.М., 2004, К вопросу о равенстве инертной и гравитационной масс макроскопического тела. – “Законодательная и прикладная метрология”, 2, с. с. 60-61.
9. Коган И.Ш., 2011, Число структурных элементов как основная физическая величина. – “Мир измерений”, 8, с.с. 46-50
10. Томилин К.А., 2006, Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах, – М.: Физматлит. – 368 с.
11. Коган И.Ш., 1998, О возможном принципе систематизации физических величин. – Законодательная и прикладная метрология. – 5 – с.с. 30-43.
12. Mills I.M., Mohr P.J., Quinn T.J., Edwin R Williams E.R., 2006, Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) . – Metrologia. – v. 43. – p.p. 227-246.