ФИЗИКА

В.А. Бубнов

Механика заряженной частицы

В работе используется нетрадиционная форма второго закона Ньютона: сила, действующая на материальную точку, вычисляется как изменение количества движения в единицу времени, умноженное на эмпирический коэффициент пропорциональности. Этот коэффициент позволяет обобщить известную формулу А. Эйнштейна, определяющую зависимость массы электрона от скорости; знак этого коэффициента позволяет также отличать ускорительные силы от замедляющих.

Ключевые слова: масса; второй закон Ньютона; электрон; ускорительные и замедлительные силы; свободные электроны.

Вся первая часть книги Ньютона [6] занята почти исключительно учением о центростремительных силах и их действиях. При этом, по Ньютону, *«центростремительная сила есть та, с которой тела к некоторой точке как к центру отовсюду притягиваются, гонятся и как бы то ни было стремятся»*.

Эту силу Ньютон всегда рассматривал как ускорительную. Отличительно то, что, вводя понятие ускорительной силы, Ньютон не пользуется понятием об ускорении, а заменяет его скоростью, производимою в продолжение заданного времени.

В наиболее общем виде в центростремительной силе Ньютон выделяет три рода величин: абсолютную, ускорительную и движущую. В частности, в его трактовке, *«ускорительная величина центростремительной силы есть мера, пропорциональная той скорости, которую она производит в течение данного времени; движущая величина центростремительной силы есть мера, пропорциональная количеству движения, которое ею производится в течение данного времени»*.

Далее Ньютон предполагал, что сила проявляется только действием на тело и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции. Исходя из этого, Ньютон определяет: *«Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения»*.

Очевидно, что происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления и от центростремительной силы. В настоящее время термин *приложенная сила* заменяется термином *сила*.

Рассмотренные понятия о силе и её количественной мере Ньютон объединяет в следующую словесную формулу: *«Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей сие и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует».*

Следует заметить, что нигде, а в этой формулировке в частности, Ньютон не говорит, что сила измеряется произведением массы тела на его ускорение. Данную формулировку следует считать вторым законом, установленным Исааком Ньютоном.

Математики, трактовавшие теорию ускоряющих сил после Ньютона, ограничивались тем, что обобщали данные им теоремы и переводили их в дифференциальную форму. К числу таких математиков следует отнести выдающегося французского исследователя Жозефа Луи Лагранжа (1736–1813).

Действительно, при построении уравнений динамики материальных тел Лагранж в своей «Аналитической механике» (см. [5]) рассматривал ускоряющие силы, действие которых непрерывно и которые стремятся в каждое мгновение сообщить бесконечно малую и одинаковую для всех частиц материи скорость. Для получения количественных соотношений указанных сил Лагранж разлагает вектор скорости $\vec{V}$ материальной точки на составляющие $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$, направленные вдоль осей x, y, z прямоугольной системы координат. Эти составляющие определяют изменение координат x, y, z материальной точки в течение времени t.

Затем ускоряющие силы, действующие на материальное тело массой m, Лагранж определяет так:

$$X = m\frac{d^2x}{dt^2},\ Y = m\frac{d^2y}{dt^2},\ Z = m\frac{d^2z}{dt^2}. \tag{1}$$

Здесь X, Y, Z — проекции ускоряющей силы $\vec{F}$.

Вторые производные в правых частях формул (1) представляют составляющие a_x, a_y, a_z вектора ускорения $\vec{a}$ данного материального тела.

Теперь соотношениям (1) можно придать следующий вид:

$$\vec{F} = m\vec{a} \text{ или } \vec{F} = m\frac{d\vec{V}}{dt}. \tag{2}$$

Выражения (2) следует рассматривать как формулы для количественного выражения ускоряющей силы в представлениях аналитической механики Лагранжа.

Если массу m в правой части (2) считать постоянной величиной, то её можно внести под знак дифференциала. В таком случае, согласно формуле Лагранжа (2), изменение количества движения $m\vec{V}$ в точности равно приложенной движущей силе $\vec{F}$, а не пропорционально последней, как в формулировке Ньютона.

Однако, несмотря на указанное различие в вычислениях силы по Лагранжу и по Ньютону, формула (2) в учебной литературе по физике считается количественной формой второго закона Ньютона, и она используется для вычисления силы любой природы.

Наряду с ускоряющими силами в природе имеют место и замедляющие силы, которые вызывают отрицательные ускорения движущихся тел.

Пример замедляющей силы имеет место в известном опыте Толмина и Стюарта, результаты которого доказывают электронную природу тока в металлах. Сущность этих опытов такова. Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному гальванометру. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра.

Согласно [3; 8], аналитический анализ данного опыта таков. При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда e действует тормозящая сила F, равная

$$F = -m\frac{dv}{dt}, \tag{3}$$

которая играет роль сторонней силы, то есть силы неэлектрического происхождения. Сторонняя сила, отнесенная к единице заряда, по определению является напряженностью E^* поля сторонних сил:

$$\frac{F}{e} = E^* = -\frac{m}{e}\frac{dv}{dt}. \tag{4}$$

Указанное поле в цепи при торможении катушки вызывает электродвижущую силу ε, равную

$$\varepsilon = E^* \cdot L = -\frac{m}{e}\frac{dv}{dt} \cdot L,$$

где L — длина проволоки катушки. Если R — сопротивление цепи, то сила тока, вызываемого этой электродвижущей силой, равна:

$$i = -\frac{m}{e}\frac{R}{L}\frac{dv}{dt}.$$

Поэтому величина заряда q, прошедшего по цепи за полное время торможения катушки, определяется формулой:

$$q = \int_{v_0}^{v_k} i dt = -\frac{m}{e}\frac{L}{R}\int_{v_0}^{v_k} dv = -\frac{m}{e}\frac{L}{R}(v_k - v_0). \tag{5}$$

В данном опыте конечная скорость v_k всегда меньше начальной скорости v_0, и в частности, когда $v_0 = 0$, формула (5) принимает вид:

$$q = \frac{m}{e}\frac{Lv_0}{R}. \tag{6}$$

Теперь, измеряя заряд q баллистическим гальванометром и зная остальные (легко измеряемые) величины v_0, L, и R, можно найти отношение массы m заряженной частицы к величине её заряда e по формуле:

$$\frac{m}{e} = \frac{qR}{Lv_0}. \tag{7}$$

По данным, приведенным в [8], в указанном опыте $\frac{m}{e} = 4{,}58 \cdot 10^{-9} \, \frac{\text{Г}}{\text{Кул.}}$, а для катодных лучей там же в [8] приводится величина $\frac{m}{e} = 5{,}66 \cdot 10^{-9} \, \frac{\text{Г}}{\text{Кул.}}$.

Близость приведенных опытных величин была принята в качестве доказательства того, что электрический ток в металлах есть движение электронов, названных свободными.

Следует заметить, что формула (3), написанная под опыт Толмина и Стюарта, отличается от традиционного выражения (2) отрицательным знаком в его правой части. В свою очередь, формула (3), написанная таким образом, обеспечивает положительное значение тормозящей силы, то есть замедляющей силы. По-видимому, приведенный пример действия замедляющей силы не является единственным в природе.

Уже отмечалось, что при написании формулы (2) Лагранж учитывал только частный случай закона пропорциональности между силой и изменением количества движения. Учитывая общий случай закона пропорциональности, заложенный в формулировке Ньютона, формулу для второго закона следует писать так:

$$c\frac{d\left(m\vec{V}\right)}{dt} = \vec{F}. \tag{8}$$

Здесь коэффициент пропорциональности c может, с одной стороны, приводить к одинаковой размерности правой и левой частей (8), с другой стороны, величина c может быть отвлеченным числом.

Если в (8) массу m тела считать постоянной величиной, то ее можно вынести из-под знака дифференциала, и тогда будем иметь для второго закона:

$$\vec{F} = c \cdot m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}. \tag{9}$$

Формула (9) переходит в (2), если $c = 1$ и в (3), когда $c = -1$. Из этого следует, что соотношение (9) справедливо как для ускорительных сил, так и для замедляющих.

Отметим, что выражение для второго закона Ньютона в форме (8) впервые встречается в курсе физики [9], но там учет константы пропорциональности c обсуждается в рамках проблемы определения массы тела.

Рассмотрим прямолинейное движения тела массой m, которое характеризуется скоростью v (t), приложенной силой F (S) и элементарным перемещением ds. В этом случае формула (9) принимает вид:

$$F(S) = c \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}. \tag{10}$$

Помножим левую и правую части в (10) на ds, учтем, что $\frac{ds}{dt} = v$, и проинтегрируем полученное соотношение:

$$\int_{S_0}^{S_k} F(S)ds = cm \int_{v_0}^{v_k} vdv = \frac{cm}{2}(v_k^2 - v_0^2). \tag{11}$$

В современном представлении интеграл слева в (11) представляет величину работы A, выполняемой силой F (S); но эта же работа равна площади под кривой F (S) на отрезке от S_0 до S_k. Указанная площадь суть положительная величина, поэтому правая часть в (11) должна быть величиной положительной, что влечет $c > 0$ для ускоренных движений (конечная скорость v_k больше начальной v_0) и $c < 0$ для замедленных движений ($v_k < v_0$).

Интересно отметить, что физический смысл формулы (11) впервые получен Ньютоном [6] в результате решения им следующей задачи.

Задача. Предлагая центростремительную силу какою угодно и допуская квадратуру кривых, требуется определить как скорость движущегося прямо к центру или от центра тела в любой точке, так и время, в течение которого оно проходит в какое-либо место и обратно.

При решении этой задачи Ньютон по второму закону вычисляет центростремительную силу и, считая, что кривая F (S) допускает квадратуру, вычисляет площадь под кривой F (S) заменой эквивалентным прямоугольником криволинейной трапеции. В результате чего он утверждает, что площадь под кривой F (S) пропорциональна изменению квадрата скорости движущегося тела.

Если при анализе опыта Тамина и Стюарта вместо формулы (3) использовать (9), то формула (7) принимает более общий вид:

$$\frac{m}{e} = -\frac{cqR}{Lv_0}, \tag{12}$$

которая при $c = -1$ переходит в (7). Заметим, что величина $\frac{m}{e}$, вычисленная по (7), почти на 20 % отличается от такой же величины, измеренной в опытах с катодными лучами. Можно уменьшить указанное различие, если в (12) принять $c = -1{,}2$, и тогда будем иметь:

$$\frac{m}{e} = 1{,}2\frac{qR}{Lv_0}. \tag{13}$$

Расчет по (13) дает:

$$\frac{m}{e} = 5{,}5 \cdot 10^{-9} \, \frac{\text{Г}}{\text{Кул.}}$$

Отличие уравнения (8) от (2) состоит не только в том, что $c \neq 1$, но и в том, что в (8) масса суть величина переменная, стоящая под знаком производной по времени t. Учитывая это обстоятельство, переписываем уравнение (8):

$$c \cdot m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} + c \cdot \vec{V} \cdot \frac{dm}{dt} = \vec{F}. \tag{14}$$

В этом уравнении наряду с вектором скорости появилась дополнительная неизвестная величина — масса тела как функция скорости, причем для различных законов механики указанная функция различна.

Например, в [1] изменение массы от времени вычислено через изменение объема частицы жидкости в процессе деформационного движения.

Известно, что при движении электрона в электромагнитном поле его масса изменяется вместе с изменением скорости. К изучению такого явления можно привлечь уравнение (8). Для чего через V обозначим скорость электрона, а через F — силу, отклоняющую электрон от его пути. В этих обозначениях уравнение (8) переписываем так:

$$c \cdot \frac{d(mV)}{dt} = F, \tag{15}$$

где m — масса электрона.

Согласно общественной формуле А. Эйнштейна, энергия электрона E вычисляется через скорость света g по формуле:

$$E = mg^2. \tag{16}$$

С другой стороны, в [7] показано, что электростатическая энергия электрона и его масса связаны между собой следующим образом:

$$W = \frac{3}{4} mg^2. \tag{17}$$

Факт различия формул (16) и (17) объясняется в [7] тем обстоятельством, что в W есть неполная энергия электрона.

Однако эти формулы можно примерить, если ввести понятие живой силы электрона. Согласно вычислениям И. Бернулли [2], живая сила материального тела пропорциональна произведению массы тела на квадрат его скорости.

В частном случае, когда коэффициент пропорциональности равен одной второй, живая сила совпадает с кинетической энергией.

Изложенные рассуждения И. Бернулли позволяют ввести для живой силы электрона формулу следующего вида:

$$T = c_3 mg^2, \tag{18}$$

в которой значения коэффициента пропорциональности c_3 зависят от характера рассматриваемой задачи.

Вернемся к уравнению (15) и входящую в него силу F выразим через изменение во времени живой силы T электрона. Действительно, работа этой силы, отнесенная к единице времени, равна $F \cdot V$, а изменение живой силы равно $\frac{dT}{dt}$. Приравниваем эти величины и получаем:

$$F \cdot V = \frac{dT}{dt} = c_3 \frac{dm}{dt} \cdot g^2. \qquad (19)$$

Теперь определяем F из (19), подставляем в (15) и после выполнения операции дифференцирования в левой части (15) будем иметь:

$$cm\frac{dV}{dt} + cV\frac{dm}{dt} = \frac{c_3 g^2}{V} \cdot \frac{dm}{dt}.$$

В этом соотношении удается разделить переменные m и V так:

$$\frac{cV\ dV}{c_3 g^2 - cV^2} = \frac{dm}{m}. \qquad (20)$$

Далее введем дополнительные обозначения $\frac{v^2}{g^2} = \beta^2$ и $\frac{c}{c_3} = \gamma$, которые позволяют равенству (20) придать удобный для интегрирования вид:

$$\frac{\gamma\beta\ d\beta}{(1 - \gamma\beta^2)} = \frac{dm}{m}. \qquad (21)$$

Производя интегрирование слева и справа в (21), получаем:

$$\ln m = -\frac{1}{2}\ln(1 - \gamma\beta^2) + \ln m_0. \qquad (22)$$

Теперь освобождаемся от логарифмов и выражению (22) придаем следующий окончательный вид:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \gamma\beta^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{c}{c_3}\frac{V^2}{g^2}}}. \qquad (23)$$

Формула (23) отражает изменение первоначальной массы m_0 электрона в зависимости от его скорости V. При $\gamma = 1$ она переходит в формулу Эйнштейна, полученную на основе принципов теории относительности.

Ранее показано, что для получения тормозящей силы необходимо в формуле (9) положить $c = -1$. Для этого случая выражение (23) переписывается так:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 + \frac{\beta^2}{c_3}}}. \qquad (24)$$

Поскольку всегда $c_3 > 0$, то действующая на электрон замедляющая сила с увеличением числа β уменьшает массу электрона.

Пусть электрон движется в магнитном поле, которое перпендикулярно направлению движения электрона и напряженность которого равна H. Со стороны магнитного поля на электрон будет действовать сила, равная $e\frac{v}{g}H$, где e — заряд электрона, v — его скорости. Отклонение электрона будет происходить по окружности радиуса R, так как указанная сила все время перпендикулярна к пути движущегося электрона. Эта сила будет действовать подобно центростремительной силе при движении тела по окружности. Величина этой силы в данном случае равна $\frac{mV^2}{R}$, где m — масса электрона.

После приравнивания рассмотренных сил получим:

$$e\frac{V}{g}H = \frac{mV^2}{R}. \tag{25}$$

Заметим, что соотношение (25) записано в электромагнитной системе единиц.

С учетом формулы (23) из (25) вычислим величину $R \cdot H$, которая оказывается равной

$$R \cdot H = \frac{m_0 g^2}{e}\frac{\beta}{\sqrt{1-\gamma\beta^2}}. \tag{26}$$

При $\gamma = 1$ формула (26) становится такой:

$$R \cdot H = \frac{m_0 g^2}{e}\frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{27}$$

В работе [4] соотношение (27) подвергалось опытной проверке, при этом в качестве экспериментальных данных использовались известные исследования Бухерера по движению β-частицы (заряд e) в однородном магнитном поле напряженностью H.

В опытах Бухерера источником излучения β-частицы была крупинка фтористого радия, помещенная в центре между двумя дисками, служившими обкладками конденсатора; и затем вся система была расположена внутри длинного соленоида, где при помощи тока образовывалось магнитное поле. Вылетающие из конденсатора β-частицы для всякого направления φ имели строго определённую скорость, получаемую в результате действия скрещенных полей, а именно: отклоняющее действие горизонтального магнитного поля компенсировалось действием на β-частицы вертикального электрического поля.

Таким образом, вне конденсатора под действием магнитного поля β-частица описывала винтовые траектории, которые попадали на фотографическую пленку, расположенную на поверхности вертикального цилиндра с осью, проходящей через центр излучения. Таким путем получалось фотографическое изображение кривой Бухерера, позволяющей измерить радиус R кривизны траектории для различных углов φ.

Автор работы [4] обработал фотографии трех кривых (№№ 15, 7, 3) и получил различные значения R и H для различных скоростей β, входящих в формулу (27). Результаты этой обработки представлены в первых двух столбцах таблицы 1.

Таблица 1

β	Опыт по [4] $R \cdot H$	$R \cdot H$ по (29)		$R \cdot H$ по (28), $\gamma = 0,96$		$R \cdot H$ по (28), $\gamma = 0,83$	
		Выч.	$\lvert\Delta_1\rvert$	Выч.	$\lvert\Delta_2\rvert$	Выч.	$\lvert\Delta_3\rvert$
0,4	740	741	1	738	2	729	11
0,5	975	980	5	974	1	954	21
0,6	1260	1273	13	1259	1	1216	44
0,7	1630	1664	34	1633	3	1543	87
0,75	1850	1925	75	1877	27	1744	106
0,8	2060	2264	204	2187	127	1984	76
0,85	2325	2739	414	2607	282	2281	44
0,9	2620	3505	885	3240	620	2669	49

Из описания опыта Бухерера следует, что его схема укладывается в теоретические представления, заложенные в соотношение (25).

Чтобы сопоставить теоретическую формулу (27) с опытными данными, необходимо вычислить постоянные величины m_0, g, e, входящие в (27). Сам Бухерер принял, что в электромагнитной системе единиц $\dfrac{e}{gm_0} = 1,767 \cdot 10^7$.

Исходя из этих данных Бухерера, автор работы [4] принимает, что $\dfrac{m_0 g^2}{e} = 1697,8$.

Следуя этому, формулы (26) и (27) переписываем так:

$$R \cdot H = 1697,8 \frac{\beta}{\sqrt{1-\gamma\beta^2}}, \tag{28}$$

$$R \cdot H = 1697,8 \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{29}$$

В таблице 1 представлены результаты сопоставления с опытом Бухерера теоретических формул (28) и (29).

К сожалению, нет никаких данных о погрешности измеряемых величин в опыте Бухерера и в методике обработки, используемой в [4]. Поэтому на основе разницы между вычисленными величинами и опытными, определяемой величинами: $|\Delta_1|$, $|\Delta_2|$, $|\Delta_3|$, можно по данным таблицы 1 сделать вывод, что каждая из формул (28) и (29) совпадает с опытными данными только в ограниченном интервале значений β.

Вернемся к выражению второго закона Ньютона в форме соотношения (14) и вычислим входящую в него величину $\frac{dm}{dt}$ с помощью формулы (23). Это приведет к следующей форме указанного закона:

$$c\left(m+\frac{m_0\beta^2\gamma}{(1-\gamma\beta^2)^{\frac{3}{2}}}\right)\frac{d\vec{V}}{dt}=\vec{F}. \qquad (30)$$

Эту форму через относительную скорость $\vec{\beta}$ можно представить так:

$$cm_0g\left(\frac{m}{m_0}+\frac{\gamma\beta^2}{(1-\gamma\beta^2)^{\frac{3}{2}}}\right)\frac{d\vec{\beta}}{dt}=\vec{F}. \qquad (31)$$

Эта форма второго закона Ньютона представляет уравнение динамики тела, масса которого изменяется в процессе движения. При этом скорость g не обязательно должна быть скоростью света. Например, она может быть скоростью звука, то есть той скоростью, которая входит в формулу (18), определяющую живую силу материальной частицы, перемещающейся в том или ином силовом поле.

При получении формулы (23), определяющей изменение массы частицы в процессе движения, считалось, что работа силы расходовалась только на изменение массы, так как указанная работа вычислялась через изменение живой силы, которая согласно формуле (18) суть функция только массы частицы.

Однако в более общем случае работа силы расходуется и на изменение скорости частицы в процессе ее движения. Для учета этого обстоятельства домножим обе части соотношения (8) скалярно на вектор скорости $\vec{V}$ и входящую в (8) массу m выразим по (23). После чего соотношение (8) принимает вид:

$$c\vec{V}\cdot\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\vec{V}}{\sqrt{1-\gamma\beta^2}}\right)=\vec{F}\cdot\vec{V}. \qquad (32)$$

Очевидно, что $\vec{F}\cdot\vec{V}=\frac{dA}{dt}$ и есть работа, произведенная силой $\vec{F}$ в единицу времени.

Далее нетрудно показать, что

$$\vec{V}\cdot\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\vec{V}}{\sqrt{1-\gamma\beta^2}}\right)=\frac{m_0\vec{V}}{(1-\gamma\beta^2)^{\frac{3}{2}}}\frac{d\vec{V}}{dt}=\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0g^2}{\gamma\sqrt{1-\gamma\beta^2}}\right).$$

Эта система равенств позволяет равенство (32) привести к виду:

$$c\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0g^2}{\gamma\sqrt{1-\gamma\beta^2}}\right)=\frac{dA}{dt},$$

который при переходе к дифференциалам принимает такую окончательную форму:

$$cd\left(\frac{m_0 g^2}{\gamma\sqrt{1-\gamma\beta^2}}\right)=dA. \tag{33}$$

Здесь dA —элементарная работа, расходуемая на изменение выражения под знаком дифференциала в левой части (33).

Отметим, что левая часть в (33) есть положительная величина как для ускорительных сил, так и для замедляющих, так как множитель $\frac{c}{\gamma}$ является положительной величиной для указанных сил.

В заключение приведем историческую справку относительно формулы: $m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, которую в современной литературе именуют формулой Эйнштейна, полученную им в теории относительности.

Эту формулу, как зависимость массы электрона от его скорости, голландский физик Х.А. Лорентц вывел еще до теории относительности. Он рассматривал тогда электрон в состоянии покоя как шар; последний, при наличии скорости, должен был сплющиться в эллипсоид Хевисайда. Этой теории «деформируемого» электрона, к которой приходит также теория относительности, немецкий физик М. Абрагам противопоставил теорию «твердого» электрона, согласно которой электрон и во время движения сохраняет форму шара. И при этом предположении получается зависимость электрона от скорости, но зависимость эта более сложная, чем зависимость, определяемая формулой Эйнштейна.

Расхождения между формулами Абрагама и Эйнштейна становятся заметными лишь при больших скоростях.

Литература

1. *Бубнов В.А.* Об уравнениях гидродинамики с переменной плотностью // Седьмые Поляховские чтения: тезисы докладов Международной конференции по механике (г. Санкт-Петербург, 2–6 февраля 2015 г.). М.: Издатель И.В. Баланов, 2015. С. 86.

2. *Бернулли И.* Рассуждения о законах передачи движений // Бернулли И. Избранные сочинения по механике / пер. и под ред. В.П. Егоршина. М. – Л.: Гл. редакция технико-теорет. лит., 1937. С. 41–172.

3. *Калашников Э.Г.* Электричество. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1977. 592 с.

4. *Кастерин Н.П.* О несостоятльности принципа относительности Эйнштейна // Отдельный оттиск из Записок Новороссийского университета. Одесса, 1919. 11 с.

5. *Лагранж Ж.* Аналитическая механика / пер. с фр. В.С. Гохмана. Т. I. М. – Л.: Гос. общество науч.-тех. изд. ИКТП СССР, 1938. 348 с.

6. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии / пер. с лат. и коммент. А.Н. Крылова; под ред. и с предисловием Л.С. Полака. 3-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 704 с. (Классики науки.)

7. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. III: Электричество . М.: Наука, 1977. 687 с.
8. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит, 1954. 620 с.
9. *Хвольсон О.Д.* Курс физики. Т. 1. 7-е изд., доп. Л. – М.: Гос. тех.-теор. изд., 1933. 647 с.

Literatura

1. *Bubnov V.A.* Ob uravneniyax gidrodinamiki s peremennoj plotnost'yu // Sed'my'e Polyaxovskie chteniya: tezisy' dokladov Mezhdunarodnoj konferencii po mexanike (g. Sankt-Peterburg, 2–6 fevralya 2015 g.). M.: Izdatel' I.V. Balanov, 2015. S. 86.
2. *Bernulli I.* Rassuzhdeniya o zakonax peredachi dvizhenij // Bernulli I. Izbranny'e sochineniya po mexanike / per. i pod red. V.P. Egorshina. M. – L.: Gl. redakciya texniko-teoret. lit., 1937. S. 41–172.
3. *Kalashnikov E'.G.* E'lektrichestvo. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Nauka, 1977. 592 s.
4. *Kasterin N.P.* O nesostoyatl'nosti principa otnositel'nosti E'jnshtejna // Otdel'ny'j ottisk iz Zapisok Novorossijskogo universiteta. Odessa, 1919. 11 s.
5. *Lagranzh Zh.* Analiticheskaya mexanika / per. s fr. V.S. Goxmana. T. I. M. – L.: Gos. obshhestvo nauch.-tex. izd. IKTP SSSR, 1938. 348 s.
6. *N'yuton I.* Matematicheskie nachala natural'noj filosofii / per. s lat. i komment. A.N. Kry'lova; pod red. i s predisloviem L.S. Polaka. 3-e izd. M.: Izd-vo LKI, 2008. 704 s. (Klassiki nauki.)
7. *Sivuxin D.V.* Obshhij kurs fiziki. T. III: E'lektrichestvo . M.: Nauka, 1977. 687 s.
8. *Tamm I.E.* Osnovy' teorii e'lektrichestva. M.: Gos. izd-vo tex.-teor. lit, 1954. 620 s.
9. *Xvol'son O.D.* Kurs fiziki. T. 1. 7-e izd., dop. L. – M.: Gos. tex.-teor. izd., 1933. 647 s.

V.A. Bubnov

Mechanics of a Charged Particle

In the paper the author uses the unconventional form of Newton's second law: the force acting on the material point is calculated as the change in the amount of motion per unit of time multiplied by the empirical coefficient of proportionality. This coefficient allows us to generalize the well-known Einstein's formula, which determines the dependence of the electron mass on velocity. The sign of this coefficient also makes it possible to distinguish between accelerating forces and decelerating forces.

Keywords: mass; Newton's second law; electron; accelerating and retarding forces; free electrons.