

УДК 524.0

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДА МЕХАНИЧЕСКИМ ШКОЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМЕТРОМ

Дзюба Д.А.¹⁾, Сапогин В.Г.²⁾, Атаманченко А.К.²⁾, Гаврилов А.М.¹⁾

¹Институт нанотехнологий и электронного приборостроения ЮФУ, Таганрог, email: diemadsjuba@yandex.ru

²Автономное образовательное учреждение, лицей №4, Таганрог, sapogin@mail.ru

В докладе построена физико-математическая модель измерения электрических параметров механического электрометра, в которые входят либо заряд, либо разность потенциалов, приложенная между корпусом и измерительным электродом. Модель позволяет получить зависимость измеряемого прибором заряда как функцию от угла отклонения измерительной стрелки от вертикали. Зависимость связана с масштабом заряда прибора, который может измерять электрометр. Масштаб заряда совпадает с максимальным значением заряда и определяется эффективной массой вращающейся стрелки и её геометрической длиной. Рассчитаны возможные параметры электрометров с различными геометрическими размерами и эффективными массами измерительной стрелки. Проведена калибровка стандартного электрометра высоковольтным источником питания. Определена связь значения заряда и электрической ёмкости прибора.

Ключевые слова: механический электрометр, заряд, разность потенциалов, измерительная стрелка, эффективная масса, масштаб измеряемого заряда, калибровка высоковольтным источником питания.

THE MEASUREMENT OF CHARGE'S VALUE BY SCHOOL MECHANICAL ELECTROMETER

Dsjuba D.A.¹⁾, Sapogin V.G.²⁾, Atamanchenko A.K.²⁾, Gavrilo A.M.¹⁾

¹Institute of nanotechnology and electronic instrumentation technology of Engineering SFU, Taganrog, email: diemadsjuba@yandex.ru

²Municipal separate educational institution, lyceum N 4, Taganrog, sapogin@mail.ru

In the report the physical and mathematical model of electrical parameters' measurement of mechanical electrometer, has been constructed. Either charge or potential difference, applied between the body and measuring electrode, are among these parameters. The model permits to obtain the dependence of charge, being measured by the device, as the function of measuring pointer's angle of deviation from vertical line. This dependence has been colligated with device's scale of charge, which can measure the electrometer. The scale of charge coincides with the maximum value of charge and is defined by effective mass of rotating pointer and by its geometrical length. The probable parameters of electrometers with the diverse geometrical sizes and effective masses of measuring pointer have been calculated. The calibration of standard electrometer with high-voltage source has been executed. The connection of charge value and electrical capacity of the device has been defined.

Key words: mechanical electrometer, charge, potential difference, measuring pointer, effective mass, scale of charge being measured, graduation by high-voltage source.

Школьный механический электрометр – прибор, служащий для измерения электрического потенциала. Устройства этого рода могут грубо фиксировать либо наличие заряда на уединённой ёмкости измерительного электрода, в этом случае их называют электроскопом, либо разность потенциалов между корпусом и измерительным электродом. В этом случае их называют электрометром. При демонстрации электростатических опытов по физике используют механическую модель электрометра, предложенную Кольбе Б.Ю. [1]. К сожалению, в нём используется шкала, в которой цена деления шкалы прибора остаётся неизвестной для демонстратора.

В заметке построена физико-математическая модель измерения заряда механическим электрометром. Получена зависимость измеряемого прибором заряда от угла отклонения измерительной стрелки. Определён масштаб заряда электрометра. Он совпадает с максимальным значением заряда, который может измеряться в идеальной модели. Проведены измерения заряда стандартным школьным электрометром. Проведена калибровка прибора высоковольтным источником питания. Определено соотношение между ёмкостью измерительного электрода и полной ёмкостью электроскопа.



Рис. 1. Механический школьный электрометр

На рис. 1 представлена фотография современного электрометра. Он состоит из измерительной стрелки 1, закреплённой на вертикальном подвесе 2, соединённой с измерительным электродом 3. Конструкция помещена в металлический цилиндрический корпус 4, который изолирован от измерительного электрода диэлектриком. Подведение к

измерительному электроду 3 электрического заряда приводит к повороту измерительной стрелки 1 на угол γ . Его значение зависит от сообщённого заряда Q .

На рис. 2 представлена схематически электрическая стрелка 1, повернувшаяся на угол γ от вертикали. Предположим, что часть заряда стрелки q и подвеса 2 точечные и сосредоточены в центре тяжести их нижних частей. Будем также предполагать, что части массы измерительной стрелки – точечные. На точечный заряд q , расположенный в точке А, на расстоянии r от другого точечного заряда действуют три силы: сила тяжести части стрелки $m\vec{g}$, сила Кулона \vec{F} и сила реакции опоры стрелки \vec{T} . Они уравнивают стрелку под углом γ к вертикали.

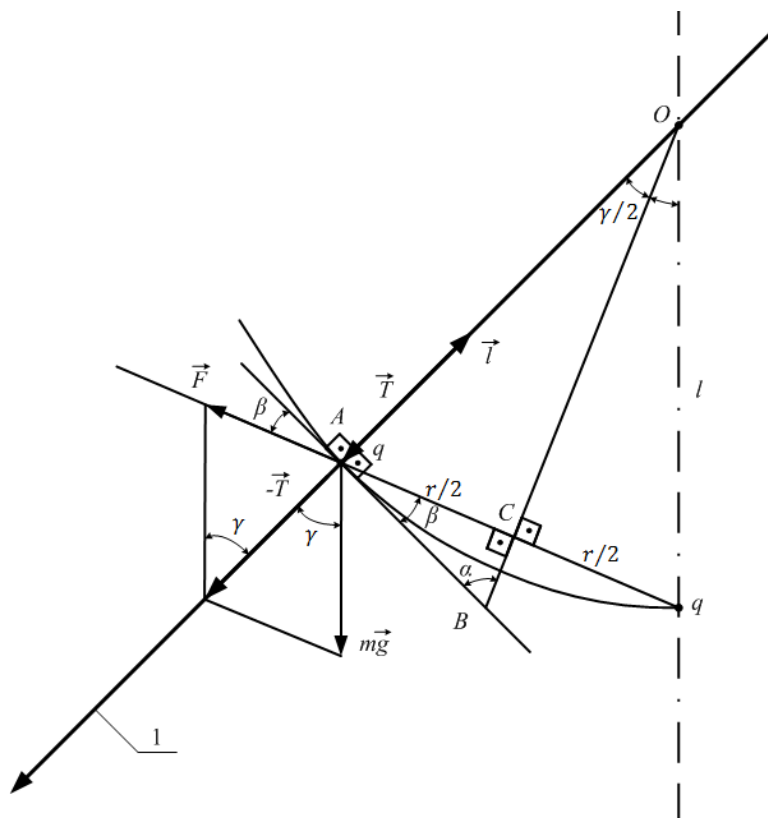


Рис. 2. Расположение основных векторов задачи

Угол β в треугольнике ABC – угол между касательной и направлением действия силы \vec{F} . Из рис. 2 видно, что $\alpha + \beta = \pi/2$ (треугольник ABC – прямоугольный) и $\alpha + \gamma/2 = \pi/2$ (треугольник AOB – прямоугольный). Из равенства следует, что $\beta = \gamma/2$.

Запишем уравнение моментов сил, действующих на заряд q , находящийся в точке А

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 = [\vec{l}, \vec{F}] + [\vec{l}, m\vec{g}] + [\vec{l}, \vec{T}] = 0. \quad (1)$$

Момент силы \vec{T} обращается в нуль, поскольку угол между векторами векторного произведения всегда равен π . Проецируя (1) на ось, перпендикулярную чертежу на рис. 2, получим равенство моментов сил

$$2F_k l \cos \beta = mgl \sin \gamma, \quad (2)$$

где \vec{l} – радиус-вектор, проведённый из точки поворота O в точку A , $F_k = kq^2 / r^2$ – сила кулоновского взаимодействия точечных зарядов, $k = (4\pi\epsilon_0)^{-1}$ м/Ф – постоянная в законе Кулона, $r = 2l \sin(\gamma / 2)$ – расстояние между зарядами, m – эффективная масса стрелки, g – ускорение свободного падения. Учтено наличие кулоновской силы в верхней части стрелки $F = 2F_k$. Из (2) следует, что

$$F_k = mg \sin(\gamma / 2). \quad (3)$$

Подставляя в (3) силу Кулона и, учитывая, что прибор измеряет полный заряд, находящийся на стрелке и измерительном электроде $Q = 4q$, получим зависимость измеряемого заряда от угла отклонения стрелки

$$Q = Q_* \sin^{3/2}(\gamma / 2), \quad (4)$$

где
$$Q_* = 8l \sqrt{mg / k} \quad (5)$$

– масштаб измеряемого заряда, который совпадает с максимальным значением заряда модели при угле отклонения измерительной стрелки $\gamma = \pi$.

В масштаб заряда вошла эффективная масса стрелки m , которую легко выразить через массу M всей стрелки из рис. 3. Для этого введём линейную плотность массы стрелки $\tau = M / L$. Тогда коэффициент уменьшения массы стрелки $\beta = (l_1 - l_2) / L = 2x / L$ связан с эффективной массой стрелки соотношением

$$m = \beta M. \quad (6)$$

Масштабы заряда электрометра рассчитаны по формуле (условии, что $l = l_1 / 2$)

$$Q_* = 2L(1 + \beta) \sqrt{2\beta M g / k} \quad (7)$$

для различных масс M стрелок и геометрических длин $L = 4l / (1 + \beta)$ (значение $\beta = 0,04$) и размещены в табл. 1.

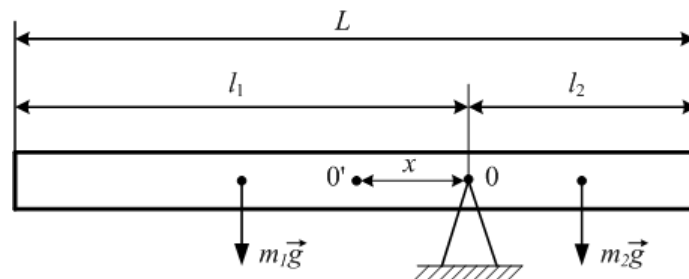


Рис. 3. К расчёту эффективной массы школьного электрометра

Таблица 1. Зависимость масштабов заряда модели Q_* от параметров стрелки (заряд в нКл)

L(мм)/M(мг)	250	500	750	1000	1250
50	10,86	15,36	18,8	21,72	24,28
100	21,72	30,72	37,62	43,44	48,56
150	32,58	46,06	56,42	65,14	72,84
200	43,44	61,42	75,22	86,86	97,12
250	54,28	76,78	94,04	108,58	121,40

Из табл. 1 видно, что значения масштаба заряда для электрометров с различными значениями длины и массы находятся в диапазоне от 10,86 нКл до 121,4 нКл.

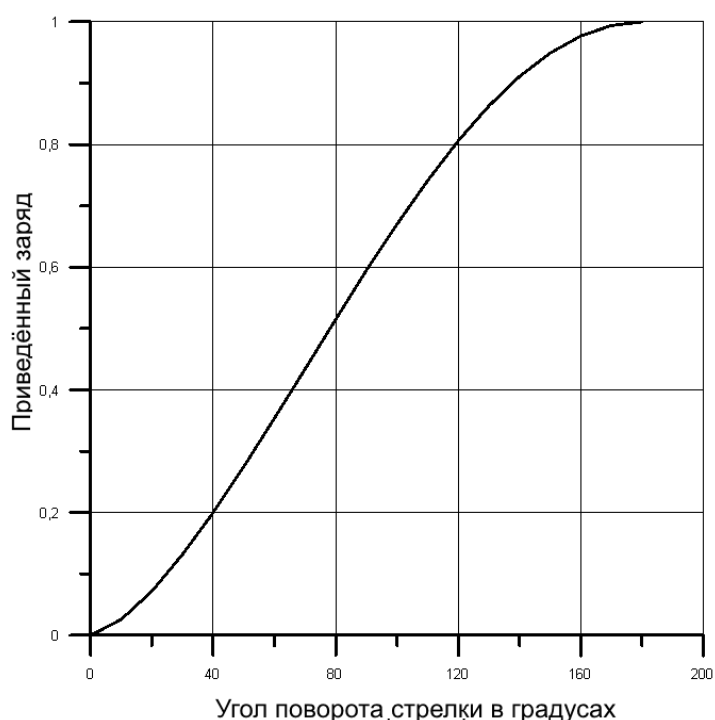


Рис. 4. Зависимость приведённого заряда модели от угла отклонения

На рис. 4 представлен график зависимости приведённого заряда модели от угла отклонения $Q/Q_* = f(\gamma)$. Из него видно, что зависимость практически линейная в области изменения углов от 30^0 до 120^0 . В таблице 2 приведена рассчитанная зависимость для электрометра, выделенного жирным шрифтом в табл. 1, в диапазоне углов от 0^0 до 90^0 , измеряемых механическим электрометром с масштабом заряда в 32,6 нКл. Из неё видно, что значения заряда, измеряемые стандартным электрометром, лежат в диапазоне 19 нКл.

Таблица 2. Зависимость приведённого заряда от угла отклонения

Q/Q_*	0,026	0,072	0,132	0,200	0,275	0,354	0,434	0,515	0,595
γ (град)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Q(нКл)	1,94	2,34	4,30	6,50	8,94	11,5	14,12	16,76	19,34

Таблица 3 содержит данные по градуировке электрометра с длиной стрелки $L=150$ мм и массой стрелки $M=250$ мг высоковольтным вольтметром. Электрометр имеет эффективную массу $m=10$ мг и масштаб заряда $Q_*=32,6$ нКл. В табл. 3 приведены значения уединённой электроёмкости измерительного электрода 2, рассчитанные по данным измерений. Как видно из табл. 3 она изменяется от измерения к измерению. Этот факт можно объяснить изменением угла расположения измерительной стрелки по отношению к вертикальному подвесу, а стало быть, к изменению среднего расстояния между обкладками конденсатора. Чем больше угол отклонения от вертикали, тем меньше уединённая электроёмкость. В табл. 3 она изменяется от 1,98 пФ до значения 8,6 пФ. Измерение полной ёмкости электрометра прибором E7-22 (измеритель LCR) даёт значение 15 пФ с погрешностью 5%. Метод экспериментального определения масштаба заряда конкретного механического электрометра в заметке не обсуждается.

Таблица 3. Данные градуировки электрометра с масштабом заряда 16 нКл

N п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
γ (град)	30	33	35	38	40	42	43	46
Q (нКл)	2,15	2,46	2,68	3,02	3,25	3,49	3,6	3,97
U (кВ)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
C (пФ)	8,60	4,92	3,58	3,02	2,60	2,32	2,06	1,98

Выводы:

- 1. Проведённое исследование позволяет увеличить точность измерений заряда механическими электрометрами в нанокулонном диапазоне.**
- 2. Оно требует установки в механических электрометрах равномерной градусной шкалы, с угловым размером до 90° с шагом в 10° .**
- 3. Повышенная точность измерений заряда механическим электроскопом позволит создать цикл лабораторной работ по физике на тему «Электростатика», в которые войдут элементы научных исследований.**

Литература

1.Индриксон Ф.Н. Электрометр//Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона в 86 томах (82 т., 4 доп.). – СПб., 1890-1907.