

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ТЕОРИИ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯЦИОННОГО МЕТОДА, СВЯЗАННЫЕ С НАПРЯЖЕНИЕМ, ПОДАВАЕНЫМ НА ЭЛЕКТРОДЫ КЮВЕТЫ

Я. В. Юпрус, Я. Ю. Рейнет

О роли напряжения, подаваемого на электроды кюветы

При определении пределов измерения радиусов и зарядов отдельных частиц аэрозолей фотографическим осцилляционным методом, существенное значение имеет построение отдельных узлов прибора. Прежде всего следует поставить условия, которым должен удовлетворять тот или иной узел, после чего найти принципиально и технически наиболее целесообразное решение.

Вопросы построения кюветы, осветительной системы, оптической и фоторегистрирующих систем имеют технический характер, так как упомянутые системы являются лишь средством измерения элементов траектории частиц. Напротив, вопрос о напряжении, подаваемом на электроды кюветы, имеет с точки зрения измерения частиц принципиальное значение, так как напряжение определяет траекторию частиц.

Кроме возможности частичной компенсации уменьшения чувствительности по заряду, форма напряжения определяет возможность определения знака заряда, а частота напряжения и амплитуда определяют частоту и амплитуду траектории, а, следовательно, и ошибки измерения элементов траектории.

В ходе исторического развития фотографического осцилляционного метода использовался целый ряд напряжений различной формы. Уэльс и Герке использовали электрическое поле постоянной величины и с переменным направлением. Фукс и Петрянов применяли коммутацию электрического поля, когда напряжение различных знаков подавалось в течение различных промежутков времени и т. д. [6].

У построенного по образцу установки Главной геофизической обсерватории имени Воейкова прибора, работающего в Тартуском государственном университете, применяется напряжение

прямоугольной формы, причем положительный участок периода напряжения имеет в 2 раза большую амплитуду, но в 2 раза меньшую длительность, чем отрицательный участок. Такая форма напряжения обеспечивает необходимую для определения знака заряда асимметричность траектории и в то же время не имеет постоянной составляющей, вследствие чего частица не покидает поля зрения в боковом направлении. (В качестве источника прямоугольного напряжения используется триггерная схема, которая запускается блокинг-генератором с регулируемой частотой. Аналогичный электронный коммутатор напряжения изготовлен в договорном порядке Проблемной лабораторией аэроионизации и электроаэрозолей Тартуского государственного университета и для НИИТЛП-а [1].)

Некоторые условия при выборе параметров напряжения

Осцилляционный метод предусматривает, чтобы напряжение было периодическим. Каждое периодическое напряжение имеет три характеристики: частоту, амплитуду и форму. Частота траекторий частиц определяется частотой напряжения и равна последней. Итак, одним из условий, которому должна удовлетворять частота напряжения, является то, чтобы она обеспечивала умещение в поле зрения подходящего числа периодов траектории для достижения достаточной точности измерения. В общем случае этим пределом снизу следует считать два периода. Итак, минимальное значение частоты выражается следующим образом:

$$f_{\text{мин}} = \frac{2V_{z_s}}{h}, \quad (1)$$

где h — высота поля зрения и V_{z_s} — скорость вертикального падения частицы.

Так, для предотвращения искажений вида траекторий рекомендуется работать при возможно более низкой частоте. Наилучшей следует считать частоту, даваемую выражением (1). В случае, когда в нашем распоряжении высота поля зрения $h=5$ мм, для аэрозольных частиц с плотностью $\gamma = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ $f_{\text{мин}}$ имеет следующие значения:

г (мкм)	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	
$f_{\text{мин}}$ (Гц)	0,05	0,20	0,43	0,80	1,2	1,7	3,0	4,7	6,9	9,3	12,2	15,4	19,1	
г (мкм)	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$f_{\text{мин}}$ (Гц)	23,0	27,4	32,1	37,3	43,0	48,8	55,0	61,6	69,0	76,0	83,5	92,0	100	104

Для одновременной регистрации большого числа частиц с различными радиусами на одном кадре и вследствие того, что реа-

лизация такого большого диапазона частот с технической стороны затруднена, можно при измерении меньших частиц пользоваться частотой, превышающей минимальную, так как пока выполнено условие $\frac{2\pi l}{\alpha} \ll 1$ (2) (где $\alpha = \frac{6\pi\eta r}{m}$, η — вязкость среды;

m, r — параметры частиц)), частица движется квазистационарно.

Под квазистационарным движением частицы подразумеваем режим движения, где горизонтальная скорость в каждый момент времени равна уравновешенной предельной скорости, обусловленной действующей в данный момент на частицу силой. В случае маленьких частиц можно ввести понятие максимальной частоты. Максимальной частотой можно считать частоту, при которой число зигзагов траекторий еще можно считать. Если максимальным счетным числом в кадре считать 25 зигзагов, то значения f_{\max} следующие:

r (мкм)	1	2	3	4	5	6
f_{\max} (Гц)	1,5	5,0	10,7	20,0	30,0	42,5

При этом при использовании простых формул вычисления заряда, соответствующих квазистационарному режиму движения, f_{\max} ограничена условием, чтобы ошибки, ввиду уменьшения амплитуды, с повышением частоты (из-за инерции частиц) были ограничены. Оказывается, что начиная с 13 мкм мы должны ввести поправку за счет уменьшения чувствительности прибора по заряду, если хотим произвести измерения с точностью 0,5% (в случае ошибки 10% соответствующий предел 19 мкм). Амплитуда напряжения ограничена снизу условием, чтобы амплитуда траекторий частиц обладала достаточной величиной для достижения необходимой точности измерений, сверху же условием, чтобы амплитуда траекторий частиц не превышала используемую ширину поля зрения. Амплитудное значение напряжения не должно превышать также величины, при которой электрическое поле в кювете вызывает возникновение самостоятельного электрического разряда. При проведении конструктивных расчетов для каждой конкретной формы напряжения можно дать необходимую оценку величины амплитуды электрического поля для измерения частиц с определенными r, q и q/m .

Рассмотрим теперь вопрос, связанный с формой напряжения. Можно использовать синусоидальное, прямоугольное или какое угодно другое периодическое напряжение. Следует отметить, что для решения большинства задач, кроме определения радиуса и абсолютной величины заряда каждой частицы, необходимо определить также знак заряда. До сих пор единственным методом определения знака заряда был выбор такой формы напряжения, чтобы при анализе соответствующей формы траектории можно было определить знак заряда.

Недостатком применения напряжения, содержащего постоянную составляющую, является быстрое исчезновение большей части частиц из поля зрения, что подтверждают все авторы, применявшие это напряжение. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только напряжения, у которых отсутствует постоянная составляющая. При графическом представлении этому условию отвечает условие равенства площадей положительного и отрицательного полупериодов.

Наиболее общий вид периодического напряжения

$$U(\omega t) = V_0 + M_1 \sin(\omega t + \psi_1) + \dots + M_n \sin(n\omega t + \psi_n) \quad , \quad (3)$$

где V_0 — постоянная составляющая напряжения.

У нас:

$$V_0 = 0;$$

M_n — амплитуда n -ной гармоники;

ψ_n — начальная фаза n -ной гармоники в момент $t=0$ [3].

Когда выполняется условие $\frac{2\pi l}{\alpha} \ll 1$, горизонтальная скорость с точностью до постоянного множителя повторяет напряжение. Частица движется квазистационарно, ее инерция не оказывает заметного влияния и форма траектории свободна от искажений. Когда же условие $\frac{2\pi l}{\alpha} \ll 1$ не выполнено, амплитуды и фазы гармонических составляющих горизонтальной скорости уже зависят от величины $\frac{2\pi l n}{\alpha}$, т. е. траектория частицы искажена вследствие инерции. Прежде всего искажения начинают влиять через высшие напряжения гармоники, для которых $\frac{2\pi l n}{\alpha}$ больше. Поэтому, исходя из этой точки зрения, следовало бы использовать напряжения, которые содержат по возможности меньше высших гармоник.

Напряжение, которое содержит только основную частоту

$$U(t) = M_1 \sin(\omega t + \psi_1), \quad (4)$$

было бы наилучшим, но оно не удовлетворяет условию определения знака заряда частицы.

Следующей возможностью было бы использование основной частоты и 2-й гармонической составляющей напряжения

$$U(t) = M_1 \sin(\omega t + \psi_1) + M_2 \sin(2\omega t + \psi_2). \quad (5)$$

В этом случае, выбирая подходящее $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$ и отношение $\frac{M_2}{M_1}$, можно получить форму напряжения, которая уже дает возможность определить знак заряда частицы.

Напряжение (5) позволяет при других равных условиях переместить возникновение искажений траектории, вызванных инерцией частиц, в направлении максимально больших частиц.

Теоретическая оценка границ применимости напряжения

Под областью применимости напряжения с конкретной амплитудой, частотой и формой подразумеваем область удельных зарядов $\frac{q}{m}$ (которая в то же время ограничена определенной областью радиусов), которыми мы можем измерить частицы с заданной точностью при других конкретных условиях (плотность частиц, высота поля зрения и пр.).

Дополнительно к искажениям формы траектории резкое уменьшение чувствительности по заряду при увеличении радиуса частиц кладет предел применимости прибора. Для оценки вопроса приведем уравнение траектории частицы в кювете.

Стационарная вертикальная скорость частицы в области Стокса, как известно, равна:

$$v_{zs} = \frac{g}{\alpha} = \text{const.} \quad (6)$$

Выберем теперь систему координат так, чтобы в момент $t=0$ было бы $x=0$ и $z=0$ (z — ось, направленная вертикально вниз, x — ось вдоль электрического поля). Тогда

$$z(t) = v_{zs} t \quad (7)$$

или

$$z(t) = \frac{g}{\alpha} t.$$

Горизонтальная скорость частицы выражается уравнением

$$v'_x + \alpha v_x - \frac{q}{m} E(t) = 0, \quad (8)$$

решение которого имеет вид

$$v_x = v_{x_0} e^{-\alpha t} + \frac{q}{m} \int_0^t E(\tau) e^{\alpha(\tau-t)} d\tau, \quad (9)$$

где

$$v_{x_0} = v_x|_{t=0}$$

Используя полученное в общем виде выражение горизонтальной скорости, найдем траекторию частицы в случае синусоидаль-

ного электрического поля

$$E(t) = E_0 \sin \omega t. \quad (10)$$

Горизонтальная скорость

$$v_x(t) = v_{x_0} e^{-\alpha t} + \frac{E_0 q}{m} e^{-\alpha t} \int_0^t \sin \omega \tau e^{\alpha \tau} d\tau.$$

Учитывая, что регистрация траекторий частиц производится после установления т. н. стационарного или периодического движения частицы, получим (после отбрасывания не интересующего нас члена, выражающего постоянное смещение, и быстро затухающего во времени компонента движения) для горизонтального смещения выражение

$$x(t) = - \frac{E_0 q}{\omega m \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \sin \left(\omega t + \arctan \frac{\alpha}{\omega} \right). \quad (11)$$

Итак, в случае коммутации электрического поля по закону синуса, траектория частицы также синусоидальна; с амплитудой

$$A = \frac{E_0 q}{\omega m \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (12)$$

(т. е. с увеличением ω уменьшается A) и со сдвигом фазы относительно электрического поля

$$\varphi = \arctan \frac{\alpha}{\omega} \quad (13)$$

Таким образом, сдвиги фазы для горизонтальной скорости и горизонтального смещения относительно фазы электрического поля следующие:

	φ_E	φ_{v_x}	φ_x
Маленькие частицы	0°	0°	90°
Большие частицы	0°	90°	0°

В особом случае, когда используется основная частота и первая гармоника

$$E(t) = E_1 \sin \omega t + E_2 \sin 2\omega t, \quad (14)$$

мы можем по аналогии сразу записать уравнение траектории частицы

$$x(z) = - \left[\frac{E_1 q}{m \omega \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \sin \left(\frac{\omega \alpha}{g} z + \arctan \frac{\alpha}{\omega} \right) + \frac{E_2 q}{2 m \omega \sqrt{\alpha^2 + (2\omega)^2}} \sin \left(\frac{2\omega \alpha}{g} z + \arctan \frac{\alpha}{2\omega} \right) \right] \quad (15)$$

Проанализируем выражение (15)

Как видно, в случае коммутации электрического поля, даваемого выражением (14), траектория частицы также состоит из суммы двух периодических синусоидальных функций, одна из которых имеет частоту основной гармоники электрического поля, а вторая — частоту второй гармоники. При этом отношении амплитуд

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{E_1}{E_2} \frac{2\sqrt{\alpha^2 + (2\omega)^2}}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}. \quad (16)$$

Изменение разности фаз при увеличении частицы изменяет только форму траектории, но не уменьшает ее асимметричности, т. е. не мешает определению знака заряда.

В дополнение к сказанному, форма траектории при увеличении радиусов изменяется в связи с изменением отношения соответствующих амплитуд траекторий $\frac{A_1}{A_2}$ основной частоты и второй гармоники. $\frac{A_1}{A_2}$ изменяется в пределах от $\frac{2E_1}{E_2}$ до $\frac{4E_1}{E_2}$. Выяснив, при каких $\frac{A_1}{A_2}$ еще можно определить знак заряда, мы можем, учитывая вышесказанное, выбрать подходящее $\frac{E_1}{E_2}$. Если принять, что знак можно считать еще определенным, когда $\frac{1}{3} < \frac{A_1}{A_2} < 3$, тогда $\frac{1}{6} < \frac{E_1}{E_2} < \frac{3}{4}$ так как

$$\frac{2E_1}{E_2} \leq \frac{A_1}{A_2} \leq \frac{4E_1}{E_2}$$

Как видно из уравнения (12), амплитуда траектории определяется, кроме амплитуды силы электрического поля $E_0 q$, через инерцию частиц, величинами m , ω и α ; т. е. радиусом частиц (при применении f_{\min}). Это как раз и обуславливает зависимость чувствительности по заряду от радиуса (а значит и от частоты).

Если горизонтальное движение частицы безынерционное, амплитуда траектории частицы при синусоидальной коммутации напряжения

$$A^0 = \frac{qE_0}{6\pi\eta g \omega} \quad (17)$$

Отношение действительной амплитуды к безынерционной

$$\frac{A}{A^0} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (18)$$

уменьшается с увеличением частицы.

Если для расчета заряда частицы использовать амплитуду траектории, на основании формулы (18) можем составить таблицу поправочных множителей или график и использовать их при вычислении заряда частиц по формулам безынерционного движения. Если начертить графики $\frac{A}{A^0}(f_{\text{мин}})$ и $\frac{A}{A^0}(2f_{\text{мин}})$, мы можем очень легко определить, насколько быстрее падает амплитуда второй гармоники по сравнению с амплитудой основной частоты.

Относительная амплитуда основной частоты

$$\frac{A_1}{A_1^0} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (19)$$

и относительная амплитуда второй гармоники

$$\frac{A_2}{A_2^0} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + (2\omega)^2}} \quad (20)$$

О чувствительности по заряду при выборе напряжения

Когда нам нужно измерить аэрозольные частицы, которые несут на себе маленькие заряды, применимость прибора ограничивает не возможность определения знака, а описанное выше понижение чувствительности по заряду при увеличении радиуса, которое нельзя компенсировать увеличением электрического поля, так как это в принципе ограничено. Пусть мы имеем максимальное амплитудное значение электрического поля E_{max} (определяется геометрией электродов, расстоянием между ними, свойствами воздуха и т. д.).

Ясно, что в случае симметричного прямоугольного напряжения, где в течение всего промежутка времени к частице приложена максимальная сила, она сдвигается больше, чем в случае любого другого напряжения, где максимально используется только часть времени. При сравнении отдельных видов электрических полей с точки зрения чувствительности по заряду, следует в выражении величины электрического поля выразить все компоненты амплитуд через E_{max} и затем найти сделанную полем электрическими силами в течение периода работу S по перемещению частицы. Большой результат отвечает с точки зрения чувствительности по заряду более выгодной форме напряжения.

Добавим, что при использовании прямоугольных напряжений более целесообразным оказывается вместо измерения амплитуды траектории измерить угол наклона траектории, отвечающий какой-либо определенной величине электрического поля.

Определив предвительно радиус частицы и зная величину электрического поля и угол наклона траектории, мы можем из соответственных построенных номограмм сразу найти заряд частицы. В литературе такой расчетный метод определения заряда описан неоднократно и по некоторым данным полная ошибка при таком методе определения заряда для частиц с радиусом в промежутке от 3 до 38 мкм равна $\pm 25\%$.

Отметим, что используя формулы для квазистационарного движения (не учитывая поправок, вызванных инерцией), можно в случае измерения угла наклона с маленькой ошибкой продвигаться дальше, чем в случае измерения амплитуды (в первую очередь обрезаются острые вершины траектории). С другой стороны, если вследствие маленького заряда и больших искажений траектория имеет уже очень вытянутую зигзагообразную форму, оказывается более целесообразным измерять амплитуду и принимать в расчет соответствующие поправки, которые дает функция $\frac{A}{A_0}$ (г). Можно составить таблицы, откуда можно непосредственно определить заряд частиц и где уже поправки, обязанные уменьшению чувствительности по заряду, приняты во внимание.

Определение знака заряда частицы с помощью световой отметки, синхронизированной напряжением

Как видим, до сих пор распространенное требование, чтобы знак заряда частицы определялся выбором подходящей формы напряжения, предъявляет к форме напряжения, исходя из другой точки зрения, нежелательные требования. Применение напряжения симметричной формы было бы предпочтительнее при осуществлении коммутации как с технической, так и с принципиальной точки зрения. Для определения же знака заряда частицы мы должны применять какой-либо иной метод. Представляется, что при применении симметричной формы напряжения единственным реальным решением при определении знака заряда является световая отметка, синхронизованная с напряжением, подаваемым на электроды кюветы, т. е. в определенной части периода напряжения делается «световой знак» (сюда следует причислить также синхронизацию начала экспозиции напряжением, которое соответствует одному «световому знаку»). Отмечать легче всего с помощью прерывания светового луча, применяемого для регистрации частиц. Например, в случае применения синусоидальной формы напряжения можно было бы делать прерывание свето-

вого потока на вершине каждого полупериода напряжения одного знака. Следует добавить, что в случае такой отметки светом становится возможным также измерение радиусов незаряженных капель, т. е. отпадает необходимость в применении источника света с прерывистым световым потоком.

Проблема синхронизации напряжения световых меток не является непреодолимой. Синхронизацию можно осуществлять электрически или механически. При модуляции светового потока, синхронизованного напряжением электрическим путем, пришлось бы построить электронный блок, который прерывал бы питание осветительной лампы при определенной величине и определенном знаке напряжения на электродах кюветы. Крайне простой представляется, однако, механическая модуляция светового потока, а именно: на ось с механическим коммутатором напряжения пришлось бы добавить прерыватель светового потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губенский, В. А., Фукс, Н. А., Определение размеров и зарядов отдельных частиц при электростатическом распылении жидких систем. — Сб. ст. НИИТЛП «Окраска изделий в электрическом поле». Изд-во «Химия», М., 1966.
2. Имянитов, И. М., Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. Гос. изд. технико-теоретической литературы, М., 1957.
3. Лэнди, Р., Девис, Д., Албрехт, А., Справочник радиоинженера. Гос. энерг. изд., М.—Л., 1961.
4. Махоткин, Л. Г., Соловьев, В. А., Атмосферно-электрические характеристики при туманах. Доклады на VI междуведомственной конференции. Изд. АН СССР, М., 1961.
5. Махоткин, Л. Г., Соловьев, В. А., Электрические заряды капель туманов и облаков. Труды ГГО, 1960.
6. Соловьев, В. А., Об одном методе измерений зарядов и размеров капель туманов. Труды ГГО, вып. 58 (180). Л., 1956.
7. Фукс, Н. А., Механика аэрозолей. Изд. АН СССР, М., 1955.

Поступила 10/I 1969 г.

MÕNED PROBLEEMID FOTOGRAAFILISE OSTSILLATSIOONIMEETODI TEOORIAS, SEOSSES KÜVETI ELEKTROODIDELE ANTAVA PINGEGA

J. Üprus, J. Reinet

Resümee

Töös on välja töötatud tingimused, mida peab rahuldama küveti elektroodidele antav pinge aerosooli üksikute osakeste laengute ja raadiuste määramisel ostsillatsioonimeetodil. On ära toodud kaalutlused pinge kuju, amplituudi ja sageduste piirkonna valikuks.

On analüüsitud pinge rakendatavuse piirkonna teoreetilist hindamist nii trajektoori kuju moonutuste kui ka laengutundlikkuse seisukohalt. Käsitlust leiavad kõik pinge teoreetilise hindamise käigus kerkivad iseloomulikud probleemid.

**SOME PROBLEMS OF THE THEORY OF THE
PHOTOGRAPHIC OSCILLATION METHOD
CONNECTED WITH THE VOLTAGE
APPLIED TO THE ELECTRODES
OF THE CUVETTE**

J. Uprus, J. Reinet

S u m m a r y

The article discusses the requirements to be satisfied by the voltage applied to the electrodes of the cuvette when establishing the charges and radii of individual aerosol particles by the oscillation method. Considerations determining the choice of the form, amplitude and frequency range of voltage have been enumerated. Theoretical evaluation of the range of voltage applicability has been analyzed from the point of view of distortions of the form of the trajectory as well as charge sensitiveness. All the specific problems arising in the process of theoretical evaluation of the charge have been dealt with.