

# ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЧАСТЬ 1

В статье обсуждаются принципы и возможности применения струйно-капельных оптических измерительных систем для контроля напряженности электрического поля (НЭП). Рассматриваются два примененных технических приема. Во-первых, отклонение летящих заряженных капель (шариков, полых гранул), используемых в качестве микрообъектов, чувствительных к НЭП и отклоняющихся от заданной прямолинейной траектории движения, подобно электрону в кинескопе. Во-вторых, стробоскопическое определение положения и/или смещений капель за счет импульсного освещения боковой стороны отклоненной капли оптическим потоком и измерения для него угла отражения. Обсуждаются возможности реализации дифференциального метода измерений НЭП. Рассматриваются особенности применения жидкостей с добавлением нанопорошков металлов или на основе жидких металлов, а также полых капель в виде микросфер или пустотелых гранул.

**Ключевые слова:** электрокапеструйные технологии, вынужденный капиллярный распад струи, капельный поток, капля, микросфера, гранула, рефлектометрический метод измерения, электростатический заряд, напряженность электрического поля.

**Введение.** Вопросы измерения напряженности электрического поля (НЭП)  $E$  актуальны для многих электрических объектов и устройств. Особенно они важны из-за возможности электризации узлов автономных, а именно летательных и космических аппаратов (КА), способных формировать и/или накапливать высокий электростатический заряд (далее — заряд)  $q$ . Исключение возможностей пробоя от зарядов, искрообразования, выхода из строя и достижение электромагнитной совместимости всех узлов важны для всех стадий изготовления и эксплуатации КА. Для этого активно совершенствуются методы и средства измерения НЭП  $E$  на основе разных принципов действия [1–8].

В настоящее время активно развиваются гидротехнологии и особенно интересны электрокапеструйные технологии, основанные на вынужденном капиллярном распаде струи (ВКРС) жидкости и формировании монодисперсных когерентных капельных потоков [9, 10]. Они используются для электрокапеструйной печати [11], в космических холодильниках-излучателях [12] крашения и промывки волокон и нитей [13], создания металлических пленок [14], плазменных источников излучения [15], повышение эффективности сгорания топлива в авиационных двигателях [16] и других задачах [17–20].

Потенциал струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС) еще не полностью раскрыт, и в связи с этим перспективны исследования, посвященные расширению их области применения, например, для измерения заряда  $q$  или

НЭП  $E$ . В открытой печати не найдено подобных технических решений, и данная статья, продолжая предыдущие подобные исследования, направлена на восполнение этого недостатка.

## 1. Основы оптоэлектрокапеструйных измерений НЭП. Принцип действия и основы реализации.

Особенности применения СКОИС для контроля НЭП представлены далее.

*1.1. Состав и принцип действия СКОИС для контроля НЭП.* СКОИС для контроля НЭП, основанная на электрокапеструйных технологиях, созданных и тщательно исследованных ранее в [9–11, 13], изображена на рис. 1. На нем обозначены генератор капель 1, калиброванное сопло 2, струя, состоящая из нераспавшейся части струи 3 и капельного потока 4, зарядное устройство (устройство сообщения униполярного заряда каплям) 5, оптический измеритель смещений капель (далее — измеритель) 6.

Из генератора капель 1 через калиброванное сопло 2 под давлением вытекает струя жидкости. Под действием дополнительного специального возмущения, накладываемого на нее управляющим моногармоническим сигналом  $U_1(t)$ , струя возбуждается, формируя не распавшуюся часть струи 3 и монодисперсный когерентный капельный поток 4, состоящий из движущихся с одинаковыми размерами  $d_{кан}$  и интервалами капель. От воздействия зарядного устройства 5, управляемого сигналом  $U_3(t)$ , капли в процессе своего образования и отделения от струи приобретают заряд  $q_{кан}$  с заданными очередностью, значением и полярностью.

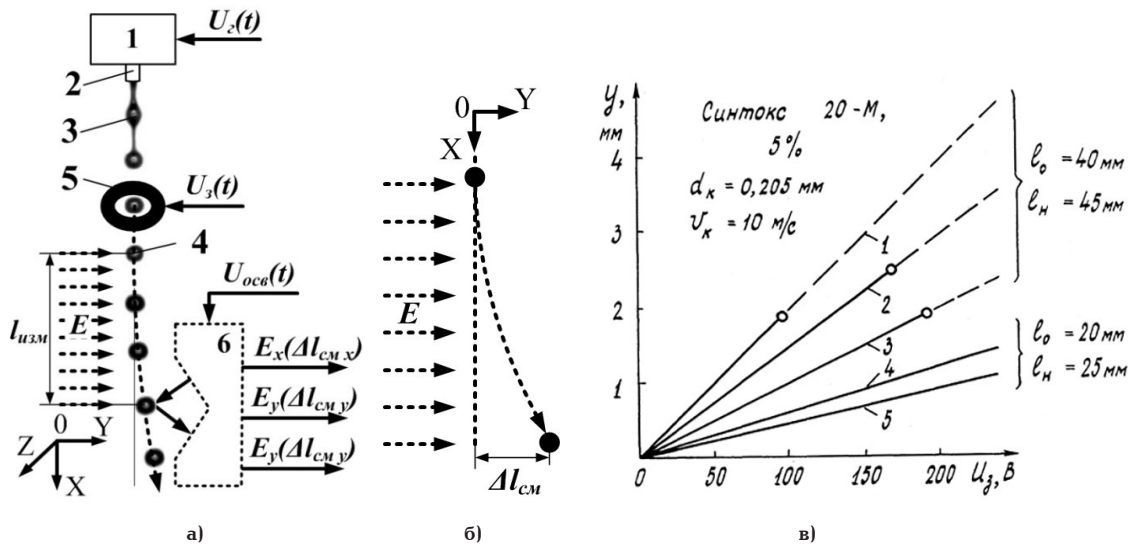


Рис. 1. СКОИС для контроля НЭП: общая схема (а), отклонения траектории движения заряженной капли при воздействии НЭП: в плоскости  $XOY$  (б), по результатам экспериментов для капель ( $d_{\text{кап}}=0,205$  мм,  $v_{\text{кап}}=10$  м/с) 5%-ной эмульсии Синтокс-20М (взято из [13])

Пролетая в пределах измерительного участка  $l_{\text{изм}}$  под действием электрического поля  $E$  заряженная капля отклоняется на значение  $\Delta l_{\text{см}}$  от изначально заданного прямолинейного движения в зависимости от значения и вектора НЭП.

Трёхкоординатные смещения отклоненной капли  $\Delta l_{\text{см } x'}$ ,  $\Delta l_{\text{см } y'}$ ,  $\Delta l_{\text{см } z}$  определяются с помощью оптического измерителя 6. Конструкция и принцип действия таких оптических измерителей могут быть различны.

В статье рассматриваются основы разработанного стробоскопического способа измерения смещений капель  $\Delta l_{\text{см}}$ . Согласно ему в момент пролета движущейся капли ее боковая сторона импульсно освещается оптическим потоком с последующим измерением трехосевых угловых отклонений  $\Delta \alpha_{\text{см}}$  отраженного света, позволяя определить трехкоординатное положение и/или смещение капли:  $\Delta l_{\text{см } x'}$ ,  $\Delta l_{\text{см } y'}$ ,  $\Delta l_{\text{см } z}$  и соответственно три составляющие НЭП:  $E(\Delta l_{\text{см } x'})$ ,  $E(\Delta l_{\text{см } y'})$ ,  $E(\Delta l_{\text{см } z})$ .

Таким образом, в процессе измерений заряженная движущаяся капля жидкости используется как микрообъект диаметром не более 1–1,5 мм, чувствительный к НЭП  $E$  ( $E \rightarrow \Delta l_{\text{см}}$ ), так и криволинейный отражатель для освещающего потока, реализуя в итоге возможности сканера, управляемого НЭП ( $\Delta l_{\text{см}} \rightarrow \Delta \alpha_{\text{см}}$ ). Соответственно, процесс измерений состоит из двух преобразований:  $E \rightarrow \Delta l_{\text{см}}$  и  $\Delta l_{\text{см}} \rightarrow \Delta \alpha_{\text{см}}$ , особенности которых рассмотрены далее.

На рис. 1в приведены экспериментально определенные графики отклонений траектории движения капель 5 %-ной эмульсии Синтокс-20М диаметром 0,205 мм, движущихся со скоростью  $v_{\text{кап}}=10$  м/с при длине измерительных участков 40 мм (графики 1–3) и 20 мм (графики 4,5), образованным плоскопараллельными отклоняющими пластинами с зазором 5 мм от их края, для НЭП:  $E_1 = E_2 \approx 1,33 \cdot 10^6$  В/м,  $E_2 = E_5 = 1,0 \cdot 10^6$  В/м,  $E_3 \approx 0,67 \cdot 10^6$  В/м. Капли заряжались напряжением  $U_з$ , создаваемым на зарядном электроде с изменением в диапазоне от 0 до 200 В. Эмульсия Синтокс-20М используется для замасливания тканей и состоит в основном из термостойких минеральных масел НЗМ-40 (или НКМ-40) — 47,7 %, замасливателя Стеарокс-6 — 24,2 %, дисциллированной воды — 11,5 %. Ее вязкость близка

к вязкости воды, коэффициент поверхностного натяжения  $\sim 0,0347$  Н/м [13].

1.2. Функция преобразования при измерении НЭП за счет контроля смещений капель  $\Delta l_{\text{см}}$ . Известно выражение отклонения заряженной капли  $\Delta l_{\text{см}}$ , движущейся в электрическом поле, созданном двумя плоскопараллельными отклоняющими пластинами длиной  $l_0$  [13]:

$$\Delta l_{\text{см}} = \frac{U_0 \cdot l_0 (2l_n - l_0)}{2m_{\text{кап}} \cdot h_0 \cdot v_{\text{кап}}^2} q_{\text{кап}}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{кап}}$ ,  $v_{\text{кап}}$  и  $q_{\text{кап}}$  — масса, скорость движения и заряд капли,  $U_0$  — напряжение, приложенное к отклоняющим пластинам,  $l_n = l_0 + l_3$  — расстояние от начала отклоняющих пластин и до линии наблюдения,  $l_3$  — зазор между окончанием отклоняющих пластин и линией наблюдения.

Применительно к измерительной схеме на рис. 1а можно принять, что определение положения движущейся капли осуществляется в пределах измерительного участка  $l_0 = l_{\text{изм}}$  ( $l_3 = 0$ ), т.е. с учетом исследований [13], сразу же за выходным срезом отклоняющих пластин.

Поэтому при пренебрежении влиянием поля заряженной капли имеем  $E = \frac{U_0}{l_0}$  и можем записать:

$$\Delta l_{\text{см}} = \frac{l_{\text{изм}}^2}{2 \cdot v_{\text{кап}}^2} \cdot \frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}} \cdot E_{\text{изм}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{изм}} = \frac{l_{\text{изм}}^2}{2 \cdot v_{\text{кап}}^2}$  — коэффициент измерений, определяемый условиями проведения измерений НЭП, а именно длиной измерительного участка  $l_{\text{изм}}$  и скоростью движения капли  $v_{\text{кап}}$ .

Чувствительность струйно-капельной технологии  $S_{\text{скм}}$  определяется отношением смещений  $\Delta l_{\text{см}}$  при движении капли к НЭП  $E$

$$S_{\text{скм}} = \frac{\Delta l_{\text{см}}}{E} = k_{\text{изм}} \cdot \frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}}, \quad (3)$$

и, как видно, она прямо пропорциональна отношению  $\frac{q_{кан}}{m_{кан}}$ , которое рассмотрим более подробно.

Максимальный заряд, получаемый каплей в процессе зарядания, ограничивается двумя условиями: возможностью дробления капли на более мелкие и современным достижимым технологическим уровнем.

Максимальный заряд сферической капли  $q_{гроб}$  в отсутствие внешнего электрического поля ограничивается значением, пока электростатические силы отталкивания элементарных зарядов на поверхности капли меньше силы поверхностного натяжения, обеспечивая целостность капли и отсутствие ее дробления. Согласно формуле Рэлея [11, 13], он определяется выражением:

$$\begin{aligned} q_{кан} \leq q_{гроб} &= \sqrt{8\pi^2 \epsilon_0 \sigma d_k^3} = \\ &= \sqrt{8 \cdot 3,14^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \times} \\ &\times \sqrt{\sigma d_k^3} \approx 26,43 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\sigma d_k^3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума),  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости (для воды  $\sigma = 0,072$  Н/м) [13]. Согласно расчетам для капли воды размером  $d_{кан} = 0,1$  мм, максимальный заряд равен  $\approx 7,1$  пКл, а для  $d_{кан} = 1,0$  мм —  $\approx 224,5$  пКл.

Современный достижимый технологический уровень зарядки капли можно определить значением  $q_{техн} \approx 400$  пКл [16]:

$$q_{кан} \leq q_{техн} \approx 400 \text{ пКл}. \quad (5)$$

Поэтому в зависимости от особенностей используемой жидкости основным используемым для расчетов должно быть меньшее из значений  $q_{гроб}$  или  $q_{техн}$ :

$$q_{кан} = \begin{cases} q_{гроб}, & q_{гроб} \leq q_{техн} = 400 \text{ пКл}, \\ q_{техн} = 400 \text{ пКл}, & q_{гроб} > q_{техн} = 400 \text{ пКл}. \end{cases} \quad (6)$$

Масса капли  $m_{кан}$  зависит от плотности жидкости  $\rho$  и ее объема  $V_{кан}$ :

$$m_{кан} = \rho \cdot V_{кан} = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left( \frac{d_{кан}}{2} \right)^3 = \frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{кан}^3}{6}. \quad (7)$$

С учетом условия дробления капли от заряда  $q_{гроб}$  (4) соотношение  $\frac{q_{кан}}{m_{кан}}$  примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{q_{vc}}{m_{vc}} &= \frac{\sqrt{8\pi^2 \epsilon_0 \sigma d_{кан}^3}}{\frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{кан}^3}{6}} \approx 17 \cdot 2,97 \cdot 10^{-6} \times \\ &\times \sqrt{\frac{\sigma}{\rho^2 \cdot d_{кан}^3}} = 50,57 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho^2 \cdot d_{кан}^3}}, \end{aligned} \quad (8)$$

а для технологически достижимого максимума заряд капли  $q_{техн} = 400$  пКл и соотношение  $\frac{q_{кан}}{m_{кан}}$  можно записать в виде:

$$\frac{q_{vc}}{m_{vc}} = \frac{400 \cdot 10^{-12}}{\frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{кан}^3}{6}} \approx \frac{0,764 \cdot 10^{-9}}{\rho \cdot d_{кан}^3}, \quad (9)$$

формируя на основе системы уравнений (6) систему уравнений для соотношения  $\frac{q_{кан}}{m_{кан}}$  в зависимости от заряда капли  $q_{кан}$ :

$$\frac{q_{vc}}{m_{vc}} = \begin{cases} 50,57 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho^2 \cdot d_{кан}^3}}, & q_{гроб} \leq q_{техн} = 400 \text{ пКл}, \\ \frac{0,764 \cdot 10^{-9}}{\rho \cdot d_{кан}^3}, & q_{гроб} > q_{техн} = 400 \text{ пКл}. \end{cases} \quad (10)$$

С учетом уравнений (2) и (10) можно записать функцию преобразования при определении значений НЭП по трем осям ( $E_x, E_y, E_z$ ) на примере измерений НЭП  $E$  вдоль оси  $OX - E_x$ :

$$E_x = \frac{1}{k_{изм}} \cdot \frac{m_{кан}}{q_{кан}} \cdot \Delta I_{см \ x}. \quad (11)$$

Измерение  $\Delta I_{см}$  осуществляется оптическими способами, рассмотренными далее, и в частности предложенным стробоскопическим способом импульсного освещения капель и рефлектометрической регистрацией положения и/или смещения отраженного луча. С учетом этого аналогично можно записать выражения и для значений НЭП вдоль осей  $OY$  и  $OZ$  соответственно  $E_y$  и  $E_z$ , определенными от  $\Delta I_{см \ y}$  и  $\Delta I_{см \ z}$  по формулам, подобным (11), позволяя в итоге записать уравнение для суммарного значения НЭП:

$$E_x = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}. \quad (12)$$

## 2. Основы оптических измерений смещений движущихся капель.

Для построения СКОИС НЭП второй является группа вопросов, связанных с особенностями использования жидкостей, и отражения от капель из них освещающего оптического потока.

**2.1. Особенности жидкостей, используемых в СКОИС НЭП.** Показатель преломления любой жидкости  $n_{кан}$  всегда больше воздуха  $n_0$ :  $n_{кан} > n_0$ , поэтому при угловом освещении капли на ее грани воздух — жидкость в большей части диапазона углов падения света для прозрачных жидкостей приводит к появлению более яркого преломленного  $I_{np}$ , следующего внутрь капли, и менее яркого отраженного  $I_{отр}$  лучей:  $I_{np} > I_{отр}$ . Однако для работы это можно считать недостатком, т.к. сквозное прохождение преломленного луча  $I_{np}$  через каплю может приводить к появлению новых переотраженных лучей и переменной зависимости интенсивности отраженного луча от угла падения к поверхности капли  $I_{отр} = F(\alpha_{пад})$ .

Эти два недостатка могут быть нивелированы путем искусственного изменения соотношения между преломленным  $I_{np}$  и отраженным лучами  $I_{отр}$  в пользу второго при использовании в качестве жидкости специальных чернил. Они могут представлять собой водный раствор с непрозрачным красителем (с высоким поглощением излучения) и пигментом типа «металлик» на основе нанопорошков металлов (алюминий, бронза, медь, в т.ч. с добавками «под золото») с размерами частиц  $\leq 50 - 100$  нм с высоким коэффициентом отражения (рис. 2а). Таким образом, можно считать, что по отражающим свойствам освещающего лазерного луча поверхность капли приближается к зеркальной во всем диапазоне углов падения:  $I_{np} \rightarrow 0$ , а  $I_{отр} \rightarrow \text{const}$  и пренебречь вышеперечисленными недостатками (рис. 2б).

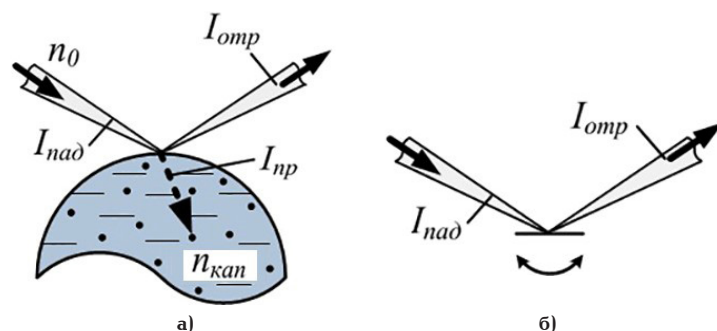


Рис. 2. Отражение оптического потока от капли: формирование преломленного  $I_{пр}$  и отраженного  $I_{отр}$  лучей от падающего  $I_{над}$  пучка (а), эквивалентная оптическая схема с формированием отраженного пучка света (б)

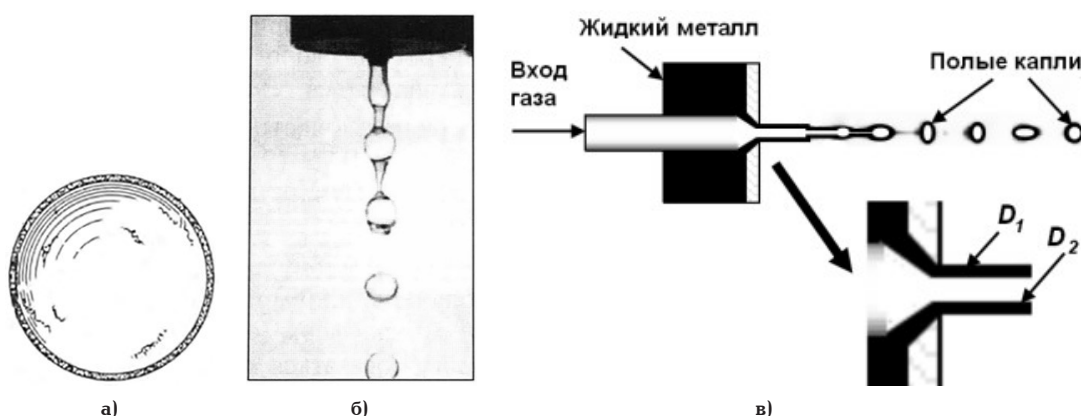


Рис. 3. Полые капли: в виде микросферы, заполненной газом (а) [9], образование полых капель: из жидкости (б) [9] и жидких металлов и сплавов (в) [10]

В режиме ВКРС с дополнительной подачей воздуха или другого газа помимо целых могут формироваться и полые капли, подобные мыльным пузырям (рис. 3а, б). Это позволяет существенно уменьшить массу капли и, соответственно, повысить соотношение  $\frac{q_{кап}}{m_{кап}}$  и, согласно формуле (11), чувствительность измерений НЭП. Для улучшения параметров режима ВКРС в жидкость добавляются поверхностно-активные вещества [9].

Кроме того, в качестве жидкости для формирования целых и полых капель могут использоваться расплавленные металлы или их сплавы (рис. 3в). Одна из особенностей этого заключается в том, что расплавы металлов щелочной группы: литий (Li), калий (K), натрий (Na) имеют плотность меньше, чем у воды (без учета температурной зависимости): 539, 862, 986 (кг/м<sup>3</sup>), а поверхностное натяжение 0,400, 0,110, 0,205 (Н/м) больше, чем у неё. Такие исходные данные также позволяют дополнительно увеличить соотношение  $\frac{q_{кап}}{m_{кап}}$  и, согласно формулам (10) и (11), чувствительность измерений НЭП. Более подробно возможности использования этих технических приемов будут рассмотрены в следующей части статьи.

**2.2. Стробоскопический способ положения капля с их импульсным освещением и рефлектометрической регистрацией отраженного луча.** В настоящее время существуют методы и средства определения положения движущихся каплей. Например, существует система ParticleMaster Shadow,

основанная на использовании фоновой засветки и оптической системы с большим увеличением. Регистрируя теневые изображения каплей в фокальной плоскости оптического устройства, эта система позволяет определять их положение [21].

В данной статье рассматриваются основы стробоскопического способа импульсного освещения каплей и рефлектометрической регистрации положения и/или смещения отраженного луча. При этом для определения положения движущихся каплей каждая из них импульсно освещается при пролете мимо измерителя 6. Синхронизация импульсного оптического потока с процессом каплеобразования и пролетом потока каплей позволяет реализовать стробоскопический способ освещения.

В основе рефлектометрического способа определения положения движущейся капли лежит использование ее криволинейной поверхности, локальный угол наклона зоны отражения света которой зависит от ее положения. И положение отраженного пучка в течение импульса света дает возможность судить о наклоне отражающей площадки и, соответственно, о положении капли. В зависимости от исходных параметров отклонения отраженного луча могут иметь угловое (рис. 1б) и линейное (рис. 1в) смещения, соответствующие перпендикулярному и продольному смещениям капли относительно падающего луча света, которые рассмотрены далее. В дальнейшем подразумевается, что длина перетяжки сфокусированного оптического потока не меньше, чем смещения центра пятна отражения света на капле.



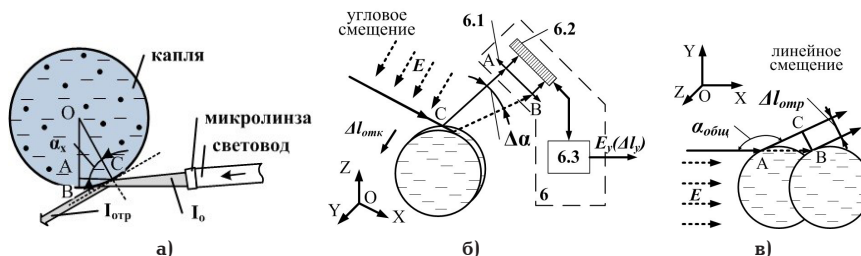


Рис. 4. Особенности отражения оптического потока от смещений капли: при определении зависимости угла между падающим и отраженным потоками света от смещения центра пятна относительно радиуса (а), при угловом (а) и линейном (б) смещениях капли

2.2.1. Угловое смещение потока света отраженного от капли. Данный случай соответствует перпендикулярному смещению капли относительно падающего луча света (рис. 4а, б). Для определения зависимости угла между падающим и отраженным потоками света от смещения центра пятна освещения относительно радиуса капли создана оптическая схема на рис. 4а. Согласно этой схеме, угол падения света  $\alpha$  эквивалентен углу ОСА, а затем из соотношений сторон прямоугольного треугольника ОСА мы получаем выражение для вычисления угла отражения лазерного луча относительно нормали к поверхности капли:

$$\frac{|OA|}{|OC|} = \frac{|OB| - |AB|}{|OC|} = \frac{r_{\text{кап}} - \Delta l_{\text{см}}}{r_{\text{кап}}} = \sin \alpha_{\text{отпр}}, \quad (13)$$

Из этой формулы можно получить

$$\alpha_{\text{отпр}} = \arcsin\left(\frac{r_{\text{кап}} - \Delta l_{\text{см}}}{r_{\text{кап}}}\right) = \arcsin\left(1 - \frac{\Delta l_{\text{см}}}{r_{\text{кап}}}\right), \quad (14)$$

где  $\Delta l_{\text{см}}$  — смещение центра пятна освещения от границы капли,  $r_{\text{кап}}$  — радиус капли.

Выражение (14) выведено для угла отражения лазерного луча относительно нормали к поверхности капли, поэтому общий угол между падающим и отраженным потоками света должен быть удвоен:

$$\alpha_{\text{общ}} = 2\alpha_{\text{отпр}} = 2 \arcsin\left(1 - \frac{\Delta l_{\text{см}}}{r_{\text{кап}}}\right). \quad (15)$$

На рис. 5 показана зависимость общего угла  $\alpha_{\text{общ}}$  между падающим и отраженным потоками света от смещения центра пятна освещения  $\Delta l_{\text{см}}$  (в диапазоне от 50 до 950 мкм, с шагом 50 мкм) на капле диаметром 1000 мкм от ее границы, определенная согласно уравнению (15). Значения  $\alpha_{\text{общ}}$  меняются от  $\approx 128^\circ$  до минус  $\approx 128^\circ$  с общим диапазоном  $\approx 256^\circ$ .

2.2.2. Линейное смещение потока света, отраженного от капли. Данный случай соответствует продольному смещению капли относительно падающего луча света (рис. 4в). При подобных смещениях положение центра пятна освещения на поверхности капли не меняется и значение общего угла  $\alpha_{\text{общ}}$  между падающим и отраженным потоками света постоянно. В соответствии со схемой (рис. 4в) отношения отрезков  $|CB|$  к  $|AB|$  можно записать в виде уравнения:

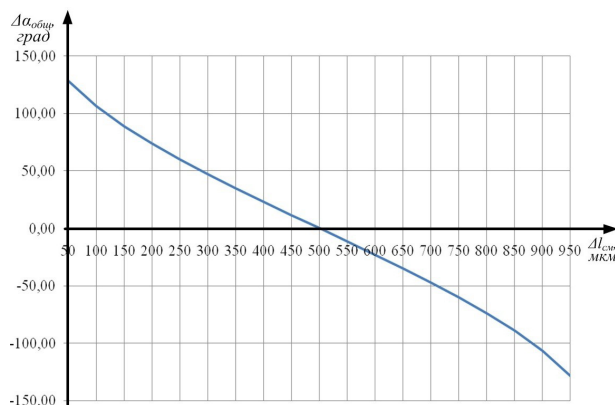


Рис. 5. Зависимость общего угла  $\alpha_{\text{общ}}$  между падающим и отраженным потоками света от смещения центра пятна освещения  $\Delta l_{\text{см}}$  (в диапазоне от 50 до 950 мкм, с шагом 50 мкм) на капле диаметром 1000 мкм от ее границы

$$\frac{|CB|}{|AB|} = \frac{\Delta l_{\text{отпр}}}{\Delta l_{\text{кап}}} = \sin(180 - \alpha_{\text{общ}}) = \sin \alpha_{\text{общ}}, \quad (16)$$

где  $\Delta l_{\text{кап}}$  и  $\Delta l_{\text{отпр}}$  — смещения капли и отраженных от нее лучей соответственно. Тогда с учетом выражения (15) можно записать

$$\Delta l_{\text{кап}} = \frac{\Delta l_{\text{отпр}}}{\sin \alpha_{\text{общ}}} = \Delta l_{\text{отпр}} \cdot \operatorname{cosec} \alpha_{\text{общ}} = \Delta l_{\text{отпр}} \cdot \operatorname{cosec} \left[ 2 \arcsin\left(1 - \frac{\Delta l_{\text{см}}}{r_{\text{кап}}}\right) \right] = \Delta l_{\text{отпр}} \cdot k_{\text{лин}}, \quad (17)$$

где  $k_{\text{лин}}$  — коэффициент линейного смещения.

На рис. 6 построен график значений коэффициента линейного смещения  $k_{\text{лин}}$  для капли диаметром 1000 мкм при смещениях  $\Delta l_{\text{см}}$  от 50 до 250 мкм, соответствующих значениям угла  $\alpha_{\text{общ}}$  от  $\approx 128^\circ$  до  $\approx 60^\circ$ . Как видно, значения  $k_{\text{лин}}$  не превосходят значения 1,3, т.е. для данного варианта линейное смещение отраженного оптического потока примерно равно смещению капли.

Как будет показано далее, регистрируемые смещения капли при угловом отклонении при размере пиксела современных ПЗС регистраторов  $\approx 3$  мкм составляют доли микрометра. Такая чувствительность к угловым смещениям существенно выше, чем к линейным смещениям, и поэтому влиянием последних на результат измерения можно пренебречь.

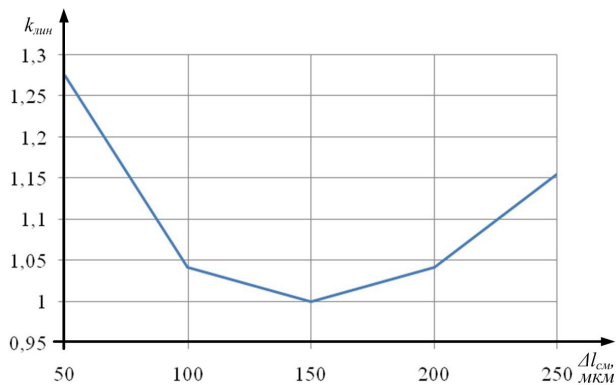


Рис. 6. Зависимость коэффициента линейного смещения  $k_{лин}$  от смещения  $\Delta l_{см}$  (от 50 до 250 мкм) центра пятна, освещающего оптического потока, от границы капли диаметром 1000 мкм

2.2.3. Минимизация смаза при регистрации движущегося изображения. Освещение в течение короткого импульса движущейся капли неизбежно приводит к смещению ее и отраженного оптического потока. При регистрации последнего возникает искажение «смаза». Так, при скорости  $v_{кап} = 1$  м/с и длительности импульса  $t_{имп} = 10$  мкс смещение капли составит  $\Delta l = 10$  мкм.

Однако уменьшение искажений «смаза» при регистрации быстро перемещающихся изображений возможно при использовании технологии временной задержки накопления или технологии «e2v» [22] за счет обеспечения сонаправленности строк пикселей регистратора направлению движения изображения. Для осуществления этого необходимо обеспечить возможность поворота ПЗС регистратора вокруг своей оси.

### 3. Определение порога чувствительности НЭП.

Порог чувствительности НЭП, предел обнаружения будет рассчитан с учетом упрощенной схемы измерителя 6 (рис. 4 б), содержащего линзу 6.1, матричный ПЗС регистратор 6.2 и контроллер 6.3.

Итак, в соответствии с рефлектометрическим методом измерений положения капли, описанным выше, минимально обнаруживаемый уровень НЭП зависит от предельного углового разрешения при контроле угла отражения света. Этот параметр имеет минимальное значение, ограниченное природой света, в частности, его дифракцией, а дифракционный предел  $\alpha_{гифр}$  описывается критерием Рэлея:

$$\alpha_{гифр} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D}, \quad (18)$$

где  $\lambda$  — длина волны света,  $D$  — апертура освещающей линзы оптического прибора. Тогда при использовании фиолетового лазера с длиной волны  $\lambda = 0,4$  мкм и длиннофокусной линзы с  $D = 50$  мм (на рис. 2а) получаем  $\alpha_{гифр} \approx 0,1 \cdot 10^{-4}$  рад.

Полученное значение полезно соотнести с параметрами устройства (рис. 4б), реализуемыми на основе современных регистраторов.

Так, для прямоугольного треугольника ABC с учетом малого угла  $\angle ACB$  и предельно малых смещений центра пятна освещения на капле можно записать:

$$\frac{|AB|}{|AC|} = \frac{l_{пзс}}{l_{онм}} = tg \alpha_{см} \approx \alpha_{см}, \quad (19)$$

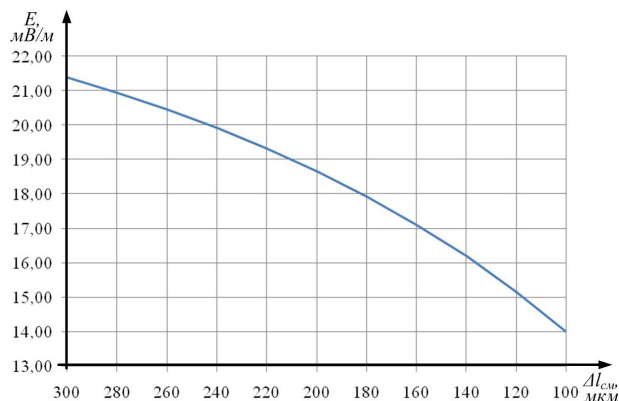


Рис. 7. Зависимость порога чувствительности НЭП  $E$  от смещения  $\Delta l_{см}$  (от 300 до 100 мкм) центра пятна, освещающего оптического потока, от границы капли диаметром 1000 мкм

где  $l_{пзс}$  — размер пикселя в ПЗС регистраторе (матричный фотоприемник),  $l_{онм}$  — расстояние от центра освещающего пятна на поверхности капли до линзы 6.1. Принимая значение размер пикселя в современных ПЗС регистратора  $l_{пзс} = 3$  мкм, а расстояние  $l_{онм} = 6$  см, получаем  $\alpha_{пер} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-2}} = 0,5 \cdot 10^{-4}$  рад. И, как видно, полученное значение

$\alpha_{пер}$  достаточно близко к рассчитанному ранее значению дифракционного предела  $\alpha_{гифр}$ .

С учетом этого определим минимально обнаруживаемый уровень НЭП, используя для расчетов  $\alpha_{пер}$ . Угловое смещение  $\alpha_{пер}$  отраженного света обусловлено смещением капли, т.е. смещением центра пятна освещения на поверхности капли  $\Delta l_{см}$ , позволяя на основе выражения (15) записать:

$$\alpha_{омр2} - \alpha_0 = 2 \arcsin \left( 1 - \frac{l_{см1}}{r_{кан}} \right) - 2 \arcsin \left( 1 - \frac{l_0}{r_{кан}} \right) = \alpha_{см} = 0,5 \cdot 10^{-4}, \quad (20)$$

где  $\alpha_0$  и  $l_0$  — начальные угол отражения и положение центра пятна освещения на поверхности капли с учетом того, что

$$l_{см1} = l_0 - \Delta l_{см}. \quad (21)$$

Для выражения (20) второй член  $\arcsin \left( 1 - \frac{l_0}{r_{кан}} \right)$  является постоянным для каждой серии измерений НЭП, а искомым является параметр  $\Delta l_{см}$ . Тогда уравнение (20) после небольших преобразований можно переписать к виду:

$$1 - \frac{l_0 - \Delta l_{см}}{r_{кан}} = \sin \left( 0,25 \cdot 10^{-4} + \arcsin \left( 1 - \frac{l_0}{r_{кан}} \right) \right). \quad (22)$$

Далее получаем соответственно

$$l_0 - \Delta l_{см} = r_{кан} \cdot \left[ 1 - \sin \left( 0,25 \cdot 10^{-4} + \arcsin \left( 1 - \frac{l_0}{r_{кан}} \right) \right) \right] \quad (3)$$

и далее имеем:

$$\Delta l_{cm} = l_0 - r_{kap} \times \left[ 1 - \sin \left( 0,25 \cdot 10^{-4} + \arcsin \left( 1 - \frac{l_0}{r_{kap}} \right) \right) \right]. \quad (24)$$

Далее расчет разрешающей способности НЭП проведен за счет формулы, полученной из (2):

$$E_{изм} = \frac{2 \cdot v_{kap}^2}{l^2} \cdot \frac{m_{kap}}{q_{kap}} \cdot \Delta l_{cm} \quad (25)$$

для следующих исходных данных:  $v_{kap} = 1$  м/с,  $l_{изм} = 5$  см = 0,05 м. Значение отношения  $\frac{q_{kap}}{m_{kap}}$  получено на основе выражений (4) и (7) для капли воды (плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>) диаметром  $d_{kap} = 1$  мм =  $10^{-3}$  м с максимально возможным зарядом, исключаяющим ее дробление,  $224,5$  пКл =  $224,5 \cdot 10^{-12}$  Кл. Тогда можно записать  $\frac{q_{kap}}{m_{kap}} = \frac{6 \cdot 224,5 \cdot 10^{-12}}{3,14 \cdot 1000 \cdot (10^{-3})^3} \approx 428,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ . С учетом этого, согласно формуле (25), имеем

$$E_{изм} = \frac{2 \cdot 1^2}{0,05^2 \cdot 428,8 \cdot 10^{-6}} \times \Delta l_{cm} \approx 1,87 \cdot 10^6 \cdot \Delta l_{cm}. \quad (26)$$

Зависимость разрешающей способности при измерении НЭП от положения центра пятна, освещающего оптический поток, относительно границы капли диаметром 1000 мкм при изменении  $\Delta l_{cm}$  в диапазоне от 100 до 300 мкм показана на рис. 7. Согласно этому графику, разрешающая способность является нелинейной функцией. Ее максимальное значение с реализацией минимального обнаруживаемого уровня НЭП соответствует минимальному значению  $\Delta l_{cm} = 100$  мкм для участка с высокой чувствительностью для капли  $d_{kap} = 1000$  мкм. Получаем искомое значение 0,014 В/м. Судя по данным из [1], полученный результат является достаточно неплохим. Он создает предпосылки для разработки измерительных устройств для измерения НЭП с реализацией дифференциального или нулевого методов измерения с измерением минимального или нулевого разбаланса соответственно.

### Заключение

1. Использование возможности отклонения летящих заряженных капель (шариков, полых гранул), применяемых в качестве микрообъектов чувствительных к НЭП, и высокоточное определение их положения и/или смещений оптическими методами может быть основой для реализации высоко разрешающих методов и средств измерения НЭП.

2. Одним из наиболее перспективных методов измерения положения и/или смещений микрообъектов может быть стробоскопический метод импульсного освещения боковой стороны отклоненной капли оптическим потоком и измерения для него угла отражения

3. В СКОИС НЭП могут быть использованы жидкости, металлы и полимеры, образующие капли, шарики и полые гранулы в жидкой и твердой агрегатной фазе соответственно. При этом в жидкости могут добавляться красители и/или пигменты типа «металлик» на основе нанопорошков металлов (алюминий, бронза, медь в т.ч. с добавками «под золото») с размерами частиц  $\leq 50-100$  нм с высоким коэффициентом отражения.

4. Разработан стробоскопический метод измерения НЭП на основе рефлектометрического из-

мерения положения и/или смещения отраженного от движущихся капель оптического потока. Определен порог чувствительности при измерении НЭП, составивший 0,014 В/м.

### Библиографический список

1. Глуховея Е. Г., Бирюков С. В. Датчики напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях // Актуальные проблемы современной науки: материалы IX Регионал. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 2020. С. 47–50.
2. Мисеюк О. П., Волченков В. И. Устройство предварительной обработки сигнала первичного преобразователя в датчике напряженности электрического поля // Датчики и системы. 2020. № 1 (243). С. 42–46. DOI: 10.25728/datsys.2020.1.7.
3. Колмогорова С. С. Развитие теории и практики изотропных измерений электростатического поля на основе динамических преобразователей: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2012. 168 с.
4. Тимонина Е. В. Повышение точности измерения напряженности низкочастотных электрических полей техногенной природы электроиндукционными датчиками: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2009. 194 с.
5. Пат. 2539130 Российская Федерация, МПК G01R 31/00, G01R 29/12 Волоконно-оптическое устройство для измерения напряженности электрического поля / Мешковский И. К., Стригалева В. Е., Аксарин С. М. № 2013136095/28, заявл. 31.07.13; опубл. 10.01.15. Бюл. № 1.
6. Renon G., Vinson P. Device for Measuring an Electric and/or Magnetic Field in Particular in a Conductor for Transporting Electrical Power. US patent 2020408855A1; filed December 18th, 2018; published December 31th, 2020.
7. Long Zhaozhi, Li Wenting, Lio Shaobo [at al.]. Implementation method of impulse electric field measurement system based on WLAN. AU patent 2021102088A4; filed April 04th, 2020; published June 10th, 2021.
8. Hortschitz W., Stifter M. Device for measuring an electric field. US patent 2020355735A1; filed November 16th, 2018; published November 12th, 2020.
9. Аметистов Е. В., Дмитриев А. С. Монодисперсные системы и технологии. Москва: Изд-во МЭИ, 2002. 390 с. ISBN 5-7046-0875-2.
10. Бухаров А. В., Анкудинов В. Б., Огородников В. П., Марухин Ю. А. Получение монодисперсных гранул из расплавленных металлов // Труды VI Рос. национал. конф. по теплообмену. Москва: Издат. дом МЭИ, 2014. С. 919–922.
11. Безруков В. И. Научно-технические основы и аппаратное обеспечение автоматизированной электрокапеструйной маркировки изделий: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2003. 563 с.
12. Коротеев А. А. Обобщенные тепловые характеристики капельных холодильников-излучателей низко- и среднетемпературных диапазонов // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 4. С. 108–117.
13. Левченко Ю. А. Управляемый метод электрокапеструйного нанесения технологических жидкостей на химические нити: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1999. 194 с.
14. Пщелко Н. С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодизэлектрических структур: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2011. 372 с.
15. Виноходов А. Ю., Кривокорытов М. С., Сидельников Ю. В., Кривцун В. М. [и др.]. Яркий источник ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы при использовании капельной жидкометаллической мишени // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 5. С. 473–480.
16. Колодяжный Д. Ю. Методология исследований и разработок электрокапеструйных способов и технологий в авиационных двигателях: дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 2020. 562 с.

17. Леун Е. В. Вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем: принцип и режимы работы, возможности и основные характеристики // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 189–195. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-189-195.

18. Леун Е. В. Вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем: регистрация сигналов акустической эмиссии и измерение температуры в зоне резания при точении, сверлении и фрезеровании // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 55–61. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-55-61.

19. Леун Е. В., Чередов А. И., Сергеев Д. В., Сысоев В. К. К вопросам построения струйно-капельных оптических измерительных систем: контроль электризации металлизированных полимерных пленок при автоматизированной лазерной перфорации // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 86–93. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-86-93.

20. Нагорный В. С. Средства автоматики гидро- и пневмо-систем. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 214 с. ISBN 978-5-8114-1652-3.

21. Particle Imaging. Мастер частиц. Интеллектуальная визуализация для определения характеристик частиц и капель.

URL: <https://www.lavision.de/en/products/particlemaster/index.php> (дата обращения: 22.06.2021).

22. Петрошенко М., Соломицкий Д. Технологии компании e2v // Компоненты и технологии. 2012. № 11 (36). С. 80–85.

---

**ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)

#### Для цитирования

Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 1 // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-83-90.

Статья поступила в редакцию 22.06.2021 г.

© Е. В. Леун