

К ВОПРОСАМ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ

В статье исследуются струйно-капельные оптические измерительные системы (СКОИС) для контроля электризации изделий типа металлизированных полимерных пленок при лазерной перфорации. В статье показано, что основной причиной электризации пленок является удаление вещества лазерным импульсом с образованием в микрообъеме плазмы газообразного ионизирующего вещества, его небольшим осаждением на кромку перфорируемого отверстия при отсутствии контакта с металлизацией пленки.

Описан режим работы СКОИС с формированием монодисперсного когерентного заряжаемого капельного потока и видеорегистрацией траектории движения его заряженных капель вдоль центров перфорируемых отверстий вблизи пленки. Определены максимальные заряды перфорируемых отверстий пленки и движущихся капель и рассчитаны смещения от их взаимодействия. Определены требования к средствам видеорегистрации и обработки полученных стробоскопических микрофотографий.

Ключевые слова: перфорация, полимерная пленка, электростатический заряд, электризация, заряженная капля, капельный поток, видеорегистрация.

Введение. При производстве экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), являющейся пассивным элементом в системе обеспечения теплового режима космического аппарата [1], используются полиимидные или полиэтилентерефталатные металлизированные полимерные пленки (в дальнейшем — пленки) с одно- или двухсторонним Al-покрытием толщиной ~0,1 мкм [2]. Для лучшего вакуумирования ЭВТИ пленки перфорируют, наиболее перспективной из которых является лазерная перфорация [3, 4].

В АО «НПО Лавочкина» создан автоматизированный лазерный перфоратор (в дальнейшем — перфоратор) для создания в пленках отверстий (рис. 1) диаметром 1...5 мм и шагом 50 мм по осям ОХ и ОУ [5–7]. Контроль электризации пленки за счет измерения остаточного нескомпенсирован-

ного электрического заряда (в дальнейшем — заряд), возникающего от лазерной перфорации, является актуальной задачей. Один из вариантов ее решения основан на использовании струйно-капельной оптической измерительной системы (СКОИС) с применением монодисперсных когерентных капельных потоков [8–15]. Данная работа продолжает серию публикаций по вопросам построения СКОИС [16, 17] для задачи контроля электризации пленок при лазерной перфорации. В открытой печати таких исследований во всей полноте ранее представлено не было, и данная статья направлена на восполнение этого недостатка.

1. Конструкция, принцип действия перфоратора и технологические особенности лазерной перфорации пленок. В разделе описаны конструкции перфоратора, входящей в него видеоизмерительной

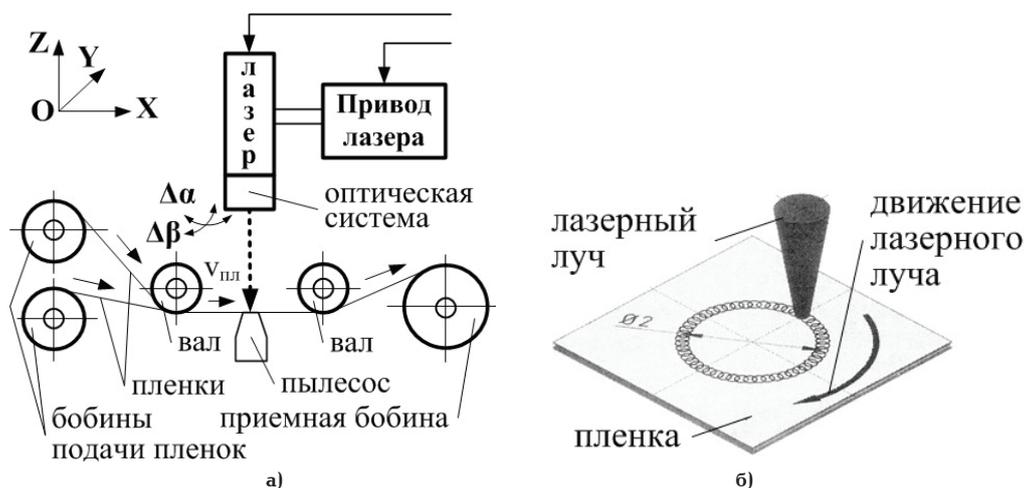


Рис. 1. Схема перфоратора (а) и импульсного удаления материала пленки по круговой траектории в процессе перфорации (б)

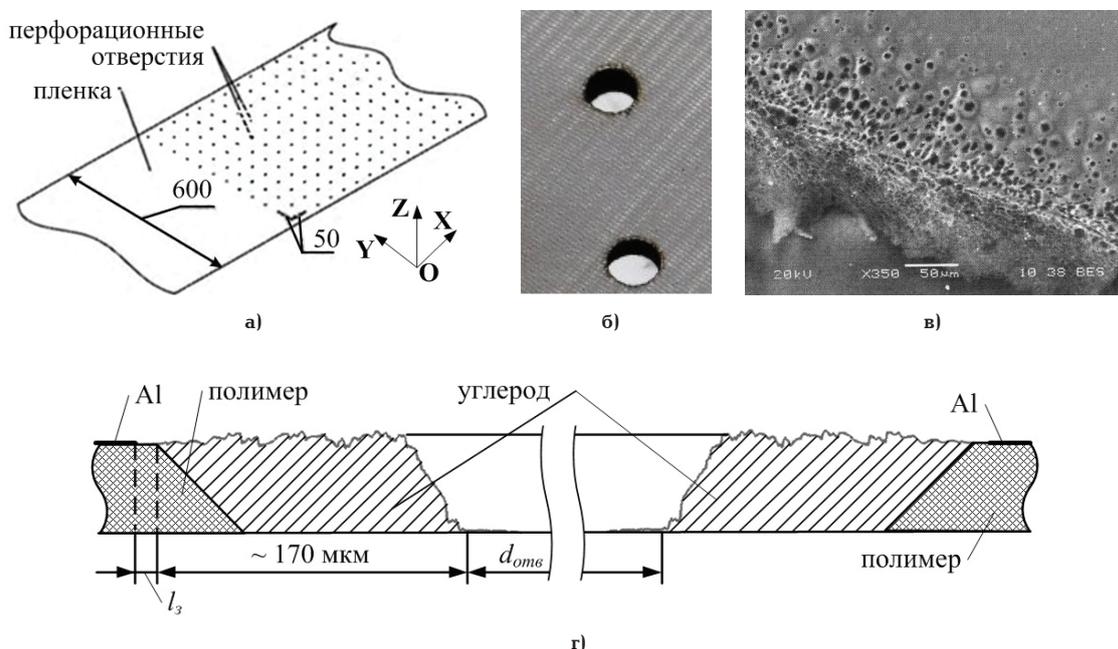


Рис. 2. Перфорационные отверстия: на пленке (а), его увеличенный фрагмент с двумя перфорационными отверстиями (б), изображение кромки в режиме композиционного контраста (в), структура материала вблизи кромки с образованием зазора l_3 между нагаром и алюминиевой металлизацией (г)

системы контроля электризации пленок и физический процесс лазерной перфорации, приводящий к появлению углеродного нагара и заряда на кромке отверстия.

1.1. Конструкция, принцип действия перфоратора. В разработанном перфораторе (рис. 1а) используются иттербиевый (Yb) волоконный импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 1,062$ мкм, средней мощностью $P_{cp} = 20$ Вт, оптическая система, фокусирующая лазерный луч в пятно на пленке с диаметром 40...60 мкм, лентопротяжный механизм с двумя валами, привод лазера, обеспечивающий линейные и угловые перемещения лазера с оптической системой и лазерного луча во время светового импульса, пылесос, воздушносвязанный с зоной перфорации, удаляющий воздушным потоком различные газовые и мелкодисперсные выделения перфорации [6, 7].

Подаваемая(ые) пленка(и) намотана(ы) на бобине(ах) и с помощью валов лентопротяжного

механизма протягивается через зону перфорации, наматываясь далее цельным полотном пленки с перфорационными отверстиями на приемную бобину. При работе натяжение пленки(ок) контролируется скоростью вращения бобин и валов.

В основе автоматизированной лазерной перфорации лежат синхронизация протягивания одной или двух пленок лентопротяжным механизмом синхронно с управлением лазером и его приводом для создания набора отверстий с импульсным точечным удалением(прожиганием) материала пленки вдоль замкнутой круговой траектории (рис. 1б) для каждого из них.

1.2. Технологические особенности лазерной перфорации пленок. Физический процесс перфорации (рис. 2) основан на мощном импульсном воздействии лазерного излучения на пленку, включающим абляцию, т.е. удаление (с небольшим частичным осаждением на кромку отверстия) вещества лазер-

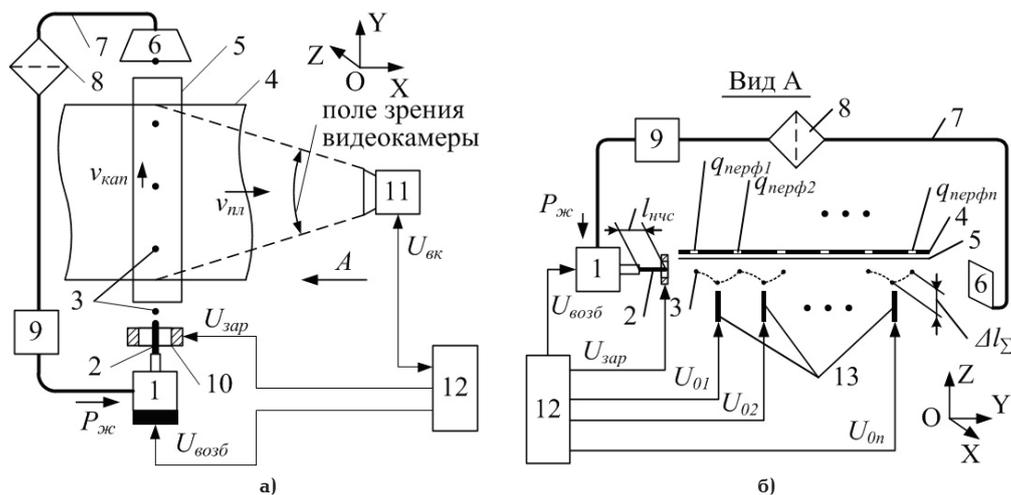


Рис. 3. Видеоизмерительная схема контроля электризации пленок при лазерной перфорации: виды сверху (а) и сбоку (б)

ным импульсом с диапазоном скоростей от испарения до микровзрыва. Этот процесс сопровождается образованием в микрообъеме плазмы, газообразного ионизирующего вещества с появлением в области перфорации пленки заряда. Так как лазерный луч освещает пленку со стороны металлизации, то большая часть заряда от осаждаемого ионизирующего вещества распределяется по всей площади металлизации пленки с отведением металлическими валами и другими деталями на корпус заземленного перфоратора.

В процессе перфорации на кромке отверстия образуется нагар (рис. 2б, в, г). Его основу составляет углерод (С) [18], который, контактируя с металлизацией пленки, способствует отводу заряда из зоны перфорации. Однако иногда контакт между углеродным проводящим нагаром с алюминиевой металлизацией пленки может отсутствовать с заполнением за счет тепловых деформаций образующегося между ними зазора l_z толщиной до 10...25 мкм диэлектрическим полимером (рис. 2в, г). Это приводит к появлению нескомпенсированного остаточного заряда $q_{перф}$.

1.3. Видеоизмерительная система контроля электризации пленок: устройство и принцип действия. В разработанном способе контроля используется электрокапельструйное устройство, подобное рассмотренному в [19–21] для формирования направленного монодисперсного когерентного капельного потока с заданной траекторией движения.

Устройство видеоизмерительной системы контроля заряда пленок ЭВТИ при лазерной перфорации (в дальнейшем — видеоизмерительная система) показано на рис. 1, на котором обозначено: головка 1, струя жидкости, состоящая из нераспавшейся части 2 длиной $l_{нчс}$ и движущегося капельного потока 3, перфорируемой пленки 4, защитной пленки 5, коллектора 7, трубопровода 7, фильтра 8, насоса 9, зарядного устройства 10, видеокамеры 11, блока управления 12.

Разработанная видеоизмерительная система (рис. 3) работает следующим образом. При подаче жидкости насосом 9 под давлением $P_{ж}$ и под воздействием моногармонического переменного сигнала $U_{возб}$ с частотой $f_{мог}$ от блока управления 12 на пьезопреобразователь головки 1 формирует вытекающую струю жидкости с нарастающими вдоль

нее по амплитуде колебания, приводящие в итоге в режиме вынужденного капиллярного распада (ВКР) с каплеобразованием и появлением нераспавшейся части струи 2 длиной $l_{нчс}$ и движущегося монодисперсного когерентного потока капель 3.

Пролетая со скоростью $v_{кап}$ через зарядное устройство 10 с импульсно подаваемым на него отрицательным сигналом $U_{зар}$ амплитудой до нескольких киловольт от блока управления 12 (преобразователь напряжения не показан на схеме), капли приобретают положительный заряд $q_{кап}$. Управление сигналом $U_{зар}$ позволяет формировать почти любой набор движущихся капель: полностью заряженный или незаряженный, а также с их любым заданным сочетанием.

Капли пролетают по оси ОХ, вдоль линий центров перфорированных отверстий со стороны диэлектрической основы пленки 4, образуя с ней малый зазор, не более 5–7 мм, с расположенной там тонкой защитной диэлектрической пленкой 5 (с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \rightarrow 1$, например, полистирол, полиэтилен и т.п.) для защиты от потенциального забрызгивания.

Положительно заряженные капли 3, пролетающие мимо заряженных участков пленки 4, отклоняются под действием силы Кулона подобно электрону в кинескопе телевизора от первоначальной траектории своего движения на $\Delta l_{кул}$ от остаточного нескомпенсированного заряда $q_{перф}$ в перфорируемых отверстиях пленки 4.

С блока управления 12 на отклоняющие электроды 13, расположенные, как вариант, между перфорируемых отверстий, подаются сигналы U_{01} , U_{02} ... U_{0n} относительно заземленной металлизации пленки, формируя в зазоре между ними электрическое поле, отклоняющее движущуюся заряженную каплю $\Delta l_{откл}$ компенсируя $\Delta l_{кул}$. В процессе измерений добиваются минимизации текущего значения отклонения Δl_z капели. Видеокамера 11 регистрирует траектории полета капель, определяя их смещения Δl_z в плоскости ХОУ, судя по которому рассчитываются значения остаточного нескомпенсированного заряда $q_{перф}$ для каждого перфорируемого отверстия.

Анализ электрических и оптических параметров СКОИС приведен далее. В исследовании сделаны два допущения: форма капель при зарядке от зарядного устройства является сферической, не учи-

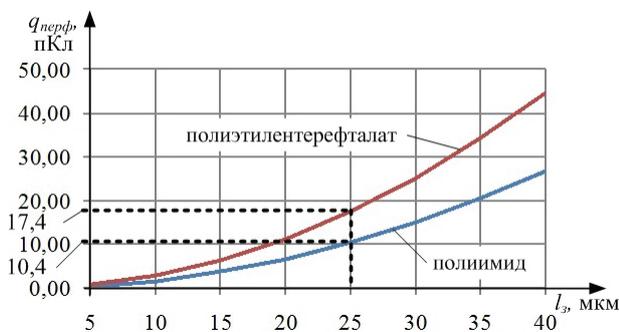


Рис. 4. Зависимости максимального заряда $q_{\text{перф}}$ на кромке перфорируемого отверстия от зазора для полиимидной и полиэтилентерефталатной пленок

тывается сила аэродинамического сопротивления при движении капель в воздухе.

2. Анализ электрических параметров СКОИС.

В разделе рассматриваются вопросы формирования движущегося заряженного капельного потока, произведены расчеты максимального заряда, образующегося после лазерной перфорации, максимального заряда сферической капли и параметров взаимодействия заряженных капель с зарядом перфорированных отверстий.

2.1. Нераспавшаяся часть струи. Нераспавшаяся часть струи, длина которой $l_{\text{нрс}}$ определяется моментом достижения амплитудой возмущения значения, равного радиусу струи $r_{\text{смп}}$, имеет периодический ряд бегущих волн с длиной $\Lambda_{\text{смп}} \approx 2,2d_{\text{смп}}$ [3, 4], возрастающих утолщений и уменьшающихся перешейков соответственно. Каждое утолщение к концу струи вырастает до отрывающейся капли диаметром $d_{\text{кан}}$, движущейся со скоростью $v_{\text{кан}} = v_{\text{смп}} \left[1 - \frac{2\sigma}{\rho \cdot r_{\text{смп}} \cdot v_{\text{смп}}^2} \right]$, где σ и ρ — поверхностное натяжение и плотность жидкости.

2.2. Начальный период формирования движущегося заряженного капельного потока. Формирующиеся капли имеют размер удвоенного диаметра струи (сопла): $d_{\text{кан}} \approx 2d_{\text{смп}}$ [11, 12], реально достигая 15–200 мкм, с возможностью увеличения до 400 мкм [15] и даже до ≈ 1000 мкм со сферичностью и однородностью по размеру не хуже 0,5 % и 0,1 % соответственно [11].

Зарядное устройство, выполненное, как вариант, в виде цилиндрической втулки длиной $l_{\text{зр}} \approx (6-8) \cdot \Lambda_{\text{смп}}$ [15], работает импульсно по сигналу $U_{\text{зар}}$ и расположено в месте разделения струи на капли, обеспечивая за счет индукционной электризации, зарядку всех или нужного набора в нужной последовательности капель, отделяющихся от струи.

В начале полета капли испытывают небольшие затухающие колебания с частотой ω_p , зависящие от силы поверхностного натяжения и полученным на своей поверхности зарядом $q_{\text{кан}}$ [11], определяемые выражением для невязкой жидкости

$$\omega_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p(p-1)}{\rho \cdot r_{\text{кан}}^3} \left[(p+2) \cdot \sigma - \frac{q_{\text{кан}}^2}{16\pi^2 \epsilon_0 \cdot r_{\text{кан}}^3} \right]}, \quad \text{где}$$

ϵ_0 — проницаемость вакуума, p — номер гармоники. Управлением этим зарядом $q_{\text{кан}}$ можно собственную частоту ω_p уменьшать до нуля. Примем, что к моменту измерений при пролете заряженной капли мимо перфорационных отверстий колебания капли затихли и заряд $q_{\text{кан}}$ не превыша-

ет максимального значения $q_{\text{к max}}$ рассчитанного далее.

2.3. Расчет максимального заряда, образующегося после лазерной перфорации. Как сказано выше, в результате лазерной перфорации между образующимся углеродным нагаром и тонкой металлизацией пленки толщиной $\sim 0,1$ мкм может образовываться зазор l_3 . Из-за тепловых деформаций полимер пленки, расширяясь, заполнит этот зазор. Поэтому максимальный заряд, образующийся после лазерной перфорации, будет ограничен электрической прочностью полимера $E_{\text{нр}}$. Для заряда $q_{\text{перф}}$ шаровидной формы значение напряженности поля $E_{\text{нр}}$, вычисляемой как $E_{\text{нр}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{\text{перф}}}{(l_3)^2}$, получаем

$$|q_{\text{перф}}| = E_{\text{нр}} 4\pi\epsilon_0 (l_3)^2. \quad (1)$$

На рис. 4 построены два графика рассчитанных значений $|q_{\text{перф}}|$ для полиимидной или полиэтилентерефталатной пленок при $U_{\text{нр}} = 150$ МВ/м и 250 МВ/м соответственно. И при $l_3 = 25$ мкм $q_{\text{перф}1} \approx 10,4$ пКл и $q_{\text{перф}2} \approx 17,4$ пКл. В связи с тем, что характеристики материалов пленок имеют допуски и близки по значениям, то для дальнейших расчетов можно упрощенно принять среднее арифметическое этих двух значений, которое равно $q_{\text{перф}} \approx 14$ пКл.

2.4. Расчет максимального заряда сферической капли. Заряд, сообщаемый капле в зарядном устройстве, зависит от диаметра струи $d_{\text{смп}}$ и заряжающего напряжения $U_{\text{зар}}$: $q_{\text{кан}} = C_{\text{к}} \cdot U_{\text{зар}}$ [15]. Обе экспериментальные зависимости изображены на рис. 5. Однако максимальный заряд сферической капли $q_{\text{к max}}$ ограничен условием нарушения целостности капли, когда электростатические силы отталкивания элементарных зарядов на отдельных точках поверхности капли превысят силы поверхностного натяжения [15]:

$$q_{\text{к max}} \leq \sqrt{8\pi^2 \epsilon_0 \alpha_q d_{\text{кан}}^3}, \quad (2)$$

где α_q — коэффициент поверхностного натяжения технологической жидкости, используемой в электрокапеструйных устройствах (для воды $\alpha_q = 72 \cdot 10^{-3}$ Н/м).

Другим важным параметром является удельный заряд $\frac{q_{\text{к max}}}{m_{\text{кан}}}$, выражение для которого с учетом (2) и уравнения для массы капли $m_{\text{кан}}$, определяемому пропорционально ее шаровидному объему $V_{\text{кан}}$ и плотности жидкости ρ

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

примет вид

$$\frac{q_{\text{к max}}}{m_{\text{кан}}} = \frac{\sqrt{8\pi^2 \epsilon_0 \alpha_q d_{\text{кан}}^3}}{\frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{\text{кан}}^3}{6}} = \frac{\sqrt{288 \epsilon_0 \alpha_q}}{\rho \cdot \sqrt{d_{\text{кан}}^3}}. \quad (4)$$

Для формул (2) и (4) были построены зависимости от $d_{\text{кан}}$ (рис. 6а, б) и для зависимости $\frac{q_{\text{к max}}}{m_{\text{кан}}}$ (рис. 6б) чувствительность (в виде смещений траектории движения) при взаимодействии с зарядом будет максимальной при $d_{\text{кан}}$ меньших, чем $< \approx 100 \dots 200$ мкм.

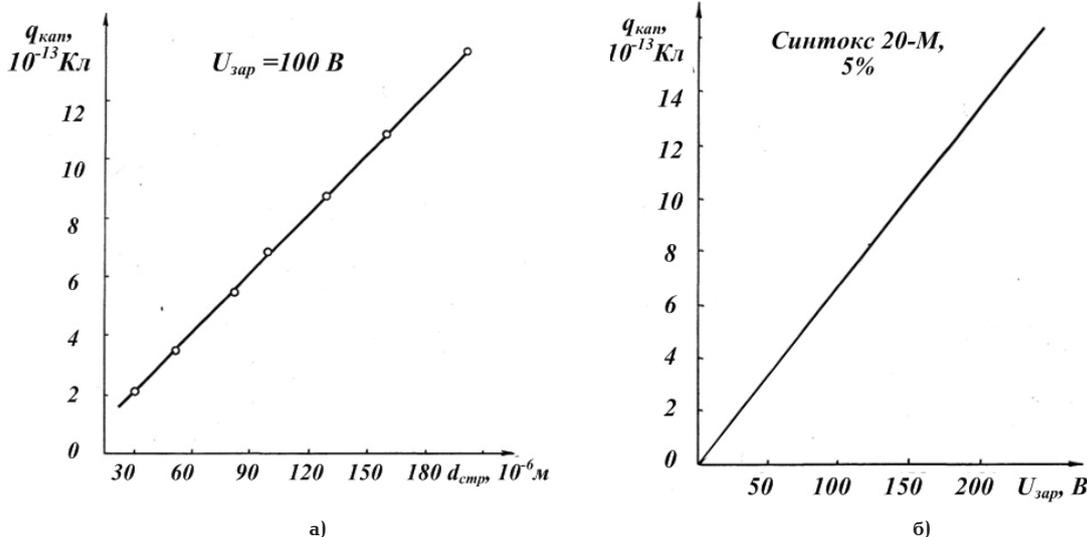


Рис. 5. Экспериментальные зависимости заряда капли от диаметра струи (а) и заряжающего напряжения (б) [15]

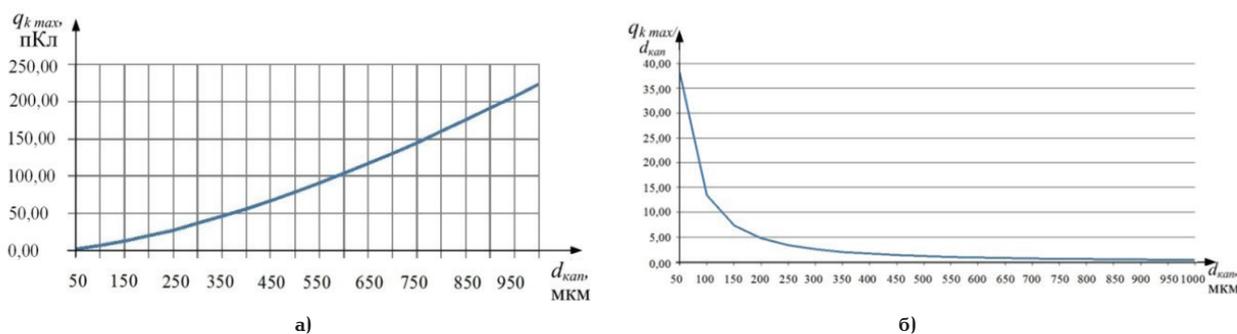


Рис. 6. Зависимости отношения максимального заряда капли $q_{k \text{ max}}$ (а) и заряда к массе $\frac{q_{k \text{ max}}}{m_{\text{kap}}}$ (б)

2.4. Взаимодействие заряженных капель с зарядом перфорированных отверстий. В связи с тем, что перфорируемые отверстия находятся, как правило, на расстоянии $l_{\text{перф}} = 50$ мм друг от друга, то сила Кулона $F_{\text{кул}}$ от заряда на пленке действует на пролетающую каплю лишь импульсно. Однако суммарное ее действие можно пересчитать с действия ее среднего значения за период $F'_{\text{кул}} = F_{\text{кул}} \cdot \frac{l_{\text{зар}}}{l_{\text{перф}}}$. Для отверстия $\varnothing = 2$ мм с размерами зоны нагара по $\approx 0,25$ мм (с небольшим запасом) с каждой его стороны имеем $l_{\text{зар}} = 2,5$ мм, и тогда $F'_{\text{кул}} = 0,05 F_{\text{кул}}$.

Смещение заряженной капли Δl_{kap} рассчитывается по формуле $\Delta l_{\text{kap}} = \frac{a \cdot t^2}{2}$, в которой ускорение a возникает под действием силы Кулона $a = \frac{F'_{\text{кул}}}{m_{\text{kap}}}$, а время t определяется временем пролета между перфорируемыми отверстиями — $t = \frac{l_{\text{перф}}}{v_{\text{kap}}}$.

Сила кулоновского взаимодействия $F_{\text{кул}} = \frac{|q_{\text{перф}}| \cdot |q_{\text{kap}}|}{4\pi\epsilon_0 \epsilon l_{\text{зар}}^2} = k \cdot \frac{|q_{\text{перф}}| \cdot |q_{\text{kap}}|}{\epsilon l_{\text{зар}}^2}$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, $q_{\text{перф}}$ и q_{kap} — электростатические заряды на кромках зоны нагара пленки после перфорации и пролетающей капли, ϵ_0 и ϵ — диэлектрическая проницаемость вакуума и среды,

в данном случае — воздуха, $l_{\text{зар}}$ — длина зазора между пленкой и каплей.

С учетом вышесказанного и уравнения для массы капли (3) смещения заряженной капли Δl_{kap} под действием силы Кулона примет вид:

$$\Delta l_{\text{кул}} = \frac{F'_{\text{кул}} \cdot l_{\text{перф}}^2}{2m_{\text{kap}} \cdot v_{\text{kap}}^2} \approx 0,43 \cdot 10^6 \cdot \frac{|q_{\text{перф}}| \cdot |q_{\text{kap}}|}{l_{\text{зар}}^2} \cdot \frac{l_{\text{перф}}^2}{d_{\text{kap}}^3 \cdot v_{\text{kap}}^2}, \quad (5)$$

откуда при учете направления движения капли получаем искомое выражение

$$q_{\text{перф}} = \frac{l_{\text{зар}}^2 \cdot d_{\text{kap}}^3 \cdot v_{\text{kap}}^2}{0,43 \cdot 10^6 \cdot |q_{\text{kap}}| \cdot l_{\text{перф}}^2} \cdot \Delta l_{\text{kap}}. \quad (6)$$

Как следует из полученного уравнения при известных значениях параметров $l_{\text{зар}}$, $l_{\text{перф}}$, d_{kap} , q_{kap} , v_{kap} по смещению капли $\Delta l_{\text{кул}}$, определяемому с помощью видеоизмерительной системы, рассчитывается значение $q_{\text{перф}}$.

2.5. Взаимодействие заряженных капель с управляемым электрическим полем. Управление направлением движения капли нужно для возможной компенсации потенциально возникающих больших значений смещений движущейся капли Δl_{kap} , выходящие за пределы диапазона измерений. Для дан-

ного технического решения напротив заземленной ($\varphi_0=0$) металлизации пленки находится электрод с потенциалом φ_1 , формируя для движущейся заряженной капли отклоняющую систему с подведенным напряжением $U_0 = \varphi_1 - \varphi_0$. Для плоскопараллельных металлизации и торца электрода, которые можно считать отклоняющими пластинами, при пренебрежении влиянием поля заряженной капли на E можно записать $E = \frac{U_0}{l_0}$, где l_0 — расстояние между отклоняющими пластинами (торцом электрода и металлизацией пленки). Тогда смещение заряженной капли записывается в виде формулы [15]:

$$\Delta l_{откл} = \frac{U_0 \cdot l_{эг} (2l_n - l_{эг})}{2m_{кап} \cdot l_0 \cdot v_{кап}^2} q_{кап}, \quad (7)$$

где $v_{кап}$ — скорость капли, $l_{эг}$ — длина электрода, l_n — расстояние от координаты электрода до координаты ближайшего центра перфорируемого отверстия, для одного из вариантов имеем $l_n = \frac{l_{перф}}{2}$.

2.6. Измерение электризации пленок. Помимо взаимодействия заряженных капель с зарядом перфорируемых отверстий (п. 2.4) и управляемым электрическим полем (п. 2.5) еще действует сила тяжести $F_{тяж}$. И её действие на движущуюся со скоростью $v_{кап}$ каплю в течение времени пролета поперек всей пленки шириной $l_{пл}$ приводит к смещению $\Delta l_{тяж}$

$$\Delta l_{тяж} = \frac{g \cdot l_{пл}^2}{2v_{кап}^2}, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$.

С учетом формул (5), (7) и (8) текущее значение Δl_{Σ} есть сумма смещений от действия силы тяжести $\Delta l_{тяж}$, кулоновского отталкивания $\Delta l_{кул}$ и отклонения в управляемом электрическом поле $\Delta l_{откл}$ (с учетом направления действия):

$$\begin{aligned} \Delta l_{\Sigma} &= \Delta l_{тяж} + \Delta l_{кул} - \Delta l_{откл} = \\ &= G + \Delta l_{кул} - \Delta l_{откл}, \end{aligned} \quad (9)$$

где G — постоянный коэффициент: $G = \Delta l_{тяж}$.

С помощью видеоизмерительной системы измеряется значение Δl_{Σ} , в виде разности искомой величины $\Delta l_{кул}$ и ее уравнивающей $\Delta l_{откл}$, реализуя дифференциальный метод измерения. При $\Delta l_{\Sigma} \rightarrow 0$, когда в результате нескольких циклов добиваются выполнения условия $\Delta l_{откл} = G + \Delta l_{кул}$, то метод измерения становится нулевым. И таким образом управлением значения $\Delta l_{откл}$ через измерение Δl_{Σ} можно определить $\Delta l_{кул}$, а далее, согласно формуле (9), рассчитать искомое значение заряда $q_{перф}$.

С учетом вышесказанного способ измерения электризации пленок и $q_{перф}$ можно реализовать разными алгоритмами, например, с использованием двух следующих операций:

1) запуск незаряженной капли и регистрация ее траектории движения;

2) запуск заряженной капли и регистрация ее траектории движения на координатах, соответствующих центрам перфорируемых отверстий. Для исключения выхода капли из поля зрения при больших значениях $q_{перф}$ возможно постепенное увеличение заряда от капли к капле.

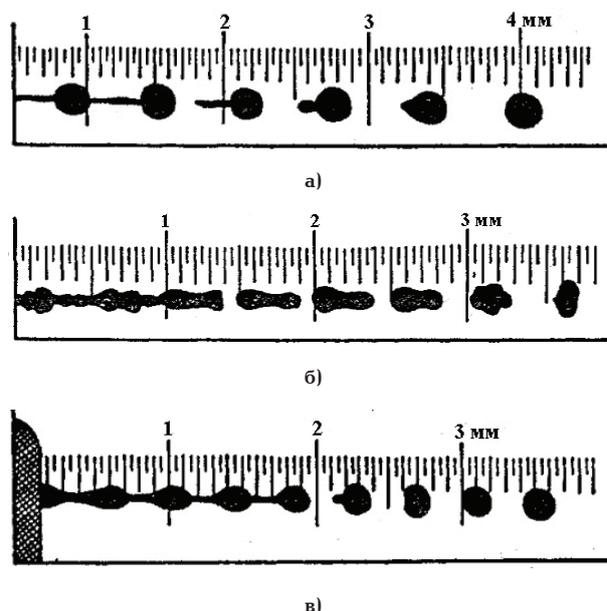


Рис. 7. Стробоскопические микрофотографии формирования процесса монодисперсного капельного потока водных чернил при $d_{ср} = 100 \text{ мкм}$ [14]

3. Анализ оптических параметров СКОИС.

В разделе обсуждаются особенности видеорегистрации траектории движения заряженных капель.

3.1. Видеорегистрация движений капель капельного потока. Современные быстродействующие средства видеорегистрации (импульсной стробоскопической микрофотографии) подвижного объекта позволяют с высокой точностью фиксировать его текущее положение и/или смещение. На рис. 7 показаны стробоскопические микрофотографии формирования процесса монодисперсного капельного потока водных чернил, полученные не позже 2003 г. [14]. Как видно, положение капли $d_{кап} \approx 200 \text{ мкм}$ и параметры ее траектории движения можно измерить с точностью не хуже $\Delta l_{вр} \approx 25 \text{ мкм}$. С учетом существенного прогресса с момента исследований [14] за прошедшие более 15 лет можно предположить, что к настоящему времени $\Delta l_{вр} \leq 10 \text{ мкм}$.

3.2. Регистратор с широким полем зрения. Уменьшение габаритов и повышение точности измерений видеоизмерительной системы обуславливают максимальное приближение видеорегистратора к капельному потоку, вынуждая увеличивать ее угол обзора. Удовлетворение этого требования возможно при использовании широкоугольных и сверхширокоугольных объективов типа «fish-eye» с полем обзора до 180° [19, 20], включая корректировку программными средствами дисторсии у получаемых стробоскопические микрофотографий.

3.3. Возможности повышения качества видеорегистрации изображений. Уменьшение искажений «смаза» при регистрации изображений быстро перемещающихся изделий возможно при использовании технологии временной задержки накопления (технология «e2v»).

Точность измерения смещений движущихся капель напрямую связана с качеством изображения, преобразованного видеокамерой. Одно из направлений повышения точности связано с применением методов субпиксельной обработки изображений, подобных рассмотренным в [21, 22].

Другое направление связано с корректировкой изображений, искаженных по разным причинам:

изменения чувствительности пикселей, смаза изображения, влиянием шумов: внутреннего и импульсного, вызванного сбоем в работе сенсоров ПЗС-матрицы или их выхода из строя (появление «битых пикселей»), гауссова — из-за шума в электронных цепях и других причин.

Как правило, для подобных корректировок используются одномерные интегральные уравнения Вольтерра I рода, Фредгольма I рода типа свертки или двумерные интегральные уравнения Фредгольма I рода типа свертки [23, 24].

Заключение.

1. Электризация отверстий пленки при ее лазерной перфорации обусловлена осаждением на кромку перфорируемого отверстия газообразного ионизирующего вещества, возникающего под действием мощного лазерного излучения и отсутствием контакта между образующимся углеродным проводящим нагаром на кромке отверстия и металлизацией пленки, не позволяющей отводить некомпенсированный остаточный заряд. Для полиимидной или полиэтилентерефталатной пленок некомпенсированный остаточный заряд может составить $\approx 10,4$ пКл и $\approx 17,4$ пКл соответственно.

2. Измерение остаточного заряда на перфорируемых отверстиях возможно за счет видеорегистрации траектории движения заряженных капель, которые выступают в качестве чувствительного элемента.

3. Корректировка траектории движения заряженных капель в управляемом электрическом поле между заземленной металлизацией пленки и дополнительно введенными электродами позволяет предотвратить большие смещения капель, исключая выход за пределы диапазона измерений.

4. Повышение точности измерений и уменьшение габаритов видеоизмерительной системы обуславливает максимальное приближение к капельному потоку, вынуждая увеличивать ее угол обзора до 180° за счет применения широкоугольных и сверхширокоугольных объективов типа «fish-eye» с корректировкой программными средствами дисторсии у получаемых стробоскопические микрофотографий.

Библиографический список

1. Луженков В. В., Игнатенко А. П. Система обеспечения теплового режима межорбитального космического буксира «Фрегат» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 37–40.
2. ОСТ 92-1380-83. Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Марки и технические требования. Введ. 01.01.1985. М., 1983. 37 с.
3. Дорофеев А. Н., Пожидаев Е. Д., Саенко В. С., Тютнев А. П. Природа электростатических разрядов на внешней поверхности космических аппаратов // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 5. С. 32–37.
4. Пленка перфорированная: Основные характеристики // «Еврофилм» — производство упаковочной продукции. 2016. URL: <http://www.eurofilm.ru/packaging/perforated-film/> (дата обращения: 29.09.2019).
5. Сысоев В. К., Вартапетов С. К., Вятлев П. А., Малинский Т. В. [и др.]. Высокоэффективный лазерный перфоратор тонких материалов на основе эксимерного лазера // Исследовано в России. 2010. Т. 13. С. 689–702.
6. Пат. 133046 Российская Федерация, МПК В 26 F 1/31, В 23 К 26/08, В 23 К 26/38. Установка для лазерной перфорации многослойных рулонных материалов / Барабанов А. А., Вятлев П. А., Грозин В. А., Сергеев Д. В., Стекольников О. Ю.,

Сысоев В. К. № 2013123479/02; заявл. 23.05.13; опубл. 10.10.13. Бюл. № 28.

7. Пат. 2561580 Российская Федерация, МПК В 26 F 1/31, В 23 К 26/382, В 23 К 26/60. Способ лазерной перфорации многослойных рулонных материалов и устройство для его осуществления / Пичхадзе К. М., Сысоев В. К., Вятлев П. А., Леун Е. В., Сергеев Д. В., Барабанов А. А. № 2014120333/02; заявл. 21.05.14; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.

8. Коротеев А. А. Обобщенные тепловые характеристики капельных холодильников-излучателей низко- и среднетемпературных диапазонов // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 4. С. 108–117.

9. Эксперимент «Капля-2» // Сайт космонавта РФ Артемьева О. Г. URL: <http://www.artemjew.ru/2014/04/17/fotokaplya-tbu/> (дата обращения: 29.09.2019).

10. Пат. 2247064 Российская Федерация, МПК В 64 G1/50, F 28 D 21/00. Капельный холодильник-излучатель / Конюхов Г. В., Коротеев А. А., Нечаев В. Ю., Петров А. И., Железняков А. Г., Баранчиков В. А., Костюк Л. Н. № 2003121089; заявл. 14.07.03; опубл. 27.02.05, Бюл. № 6.

11. Аметистов Е. В., Дмитриев А. С. Монодисперсные системы и технологии: моногр. М.: МЭИ, 2002. 390 с. ISBN 5-7046-0875-2.

12. Бухаров А. В. Теплофизические проблемы получения стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по скорости и размерам капель: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 390 с.

13. Нагорный В. С. Электрокапельные регистрирующие устройства. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 269 с. ISBN 5-217-00012-0.

14. Безруков В. И. Научно-технические основы и аппаратное обеспечение автоматизированной электрокапельной маркировки изделий: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2003. 563 с.

15. Левченко Ю. А. Управляемый метод электрокапельного нанесения технологических жидкостей на химические нити: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 194 с.

16. 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.

17. 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.

18. Сысоев В. К., Барабанов А. А., Вятлев П. А., Сергеев Д. В. Физико-химические свойства перфорированных лазерным излучением металлизированных полимерных пленок // Письма о материалах. 2015. Т. 5, № 1. С. 7–10.

19. Пат. 2379722 Российская Федерация, МПК G 02 В 9/64. Широкоугольный объектив типа рыбий глаз / Бронштейн И. Г., Васильев В. Н., Лившиц И. Л., Михайличенко С. А., Мамаев В. Ю., Сергеев М. Б., Снопов В. В., Руфанов С. В. № 2008139656; заявл. 06.10.08, опубл. 20.01.10, Бюл. № 2.

20. Пат. 2626298 Российская Федерация, МПК G 02 В 9/62, G 02 В 13/06. Объектив типа рыбий глаз / Богданков В. А. № 2016106624; заявл. 26.02.16, опубл. 25.07.17, Бюл. № 21.

21. Кавиева Е. С. Методы и алгоритмы субпиксельной обработки цифровых изображений: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 126 с.

22. Резник А. Л. Методы, алгоритмы и программы для ускоренного решения трудоемких задач обработки случайных дискретных полей и цифровых изображений: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2004. 241 с.

23. Сизиков В. С., Кирьянов К. А. Два быстрых алгоритма восстановления смазанных изображений // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 24–30.

24. Sizikov V. S., Ekzemliarov R. A. Operating sequence when noise is being filtered on distorted images // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80 (1). P. 28–34. DOI: 10.1364/JOT.80.000028.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина».

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

ЧЕРЕДОВ Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 6957-1660

AuthorID (РИНЦ): 471995

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

СЕРГЕЕВ Даниил Владимирович, кандидат технических наук, инженер-конструктор 2-й категории АО «НПО Лавочкина».

Адрес для переписки: sdv@laspace.ru

СЫСОЕВ Валентин Константинович, доктор технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина».

SPIN-код: 5673-6495

AuthorID (РИНЦ): 565837

Адрес для переписки: sdv@laspace.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Чередов А. И., Сергеев Д. В., Сысоев В. К. Вопросы 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.

Статья поступила в редакцию 07.10.2019 г.

© Е. В. Леун, А. И. Чередов, Д. В. Сергеев, В. К. Сысоев