

## ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: ПРИНЦИП И РЕЖИМЫ РАБОТЫ, ВОЗМОЖНОСТИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Статья посвящена оптическим измерительным системам, использующим в качестве оптических элементов три типа гидротоков: немодулированной струи и двух частей модулированной струи в режиме вынужденного капиллярного распада: нераспавшейся части струи и капельного потока. Проведена классификация струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС), представлены схемы для измерения смещений изделия и неровности его поверхности, реализующие гидроструйный интерференционный способ измерения линейных размеров изделий и т.н. капельный микроскоп. Рассмотрены вопросы передачи света и управления параметрами гидротоков.

**Ключевые слова:** струйно-капельный поток, распад струи, размер изделия, неровность поверхности, оптические измерения, интерферометр, микроскоп.

**Введение.** В современное время в ракетно-космических отраслях, станко-, машино- и приборостроении активно используются оптические свойства жидкостей за счет активного развития направлений, связанных с совместным использованием жидких сред и оптических потоков [1, 2], созданием в результате вынужденного капиллярного распада (ВКР) струи монодисперсных когерентных капельных потоков для холодильников-излучателей космических аппаратов [3, 4], струйно-капельными технологиями: струйной печатью и крашения волокон [5, 6], исследованием особенностей удара капли о преграду [7, 8], изучением поведения капли или капельного потока в электрическом и магнитном полях [9].

После появления в 2015 году струйного способа измерения линейных размеров изделий [10] и других работ [11–14] начинает проявляться новое направление, связанное со струйно-капельными оптическими измерительными системами (СКОИС), в которых струя, капля и/или капельный поток применяются как управляемые оптические элементы. Использование для гидротоков смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) позволяет таким СКОИС удачно встраиваться в металлорежущие станки для активного контроля размеров, неровностей поверхности и температуры изделий, занимая промежуточное положение между контактными и бесконтактными, в частности, оптическими средствами измерений.

В печати подобные СКОИС не описаны и данная статья, стремясь восполнить этот недостаток, начинает серию авторских публикаций на эту тему.

**1. Классификация СКОИС.** Конструкции СКОИС можно классифицировать в зависимости от следующих параметров:

— от модуляции струи для ВКР: немодулированная или модулированная струя, последняя из которых включает нераспавшуюся часть струи и капельный поток;

— от угла подачи  $\alpha$  потока к поверхности изделия: с фронтальным ( $\alpha = 90^\circ$ ) или угловым ( $\alpha < 90^\circ$ ) потоками;

— от прямолинейности гидротока: прямоили криволинейный гидротока;

— от наличия или отсутствия гидроконтakta с поверхностью: без гидроконтakta и с гидроконтактом;

— от измеряемого параметра: смещения изделия и/или неровности его поверхности;

— от количества используемых сопел: одно-, двух-, трех-, ... многосошловые.

**2. Состав, принцип и режимы работы СКОИС.** Принцип действия СКОИС основан на формировании направленного на изделие одного гидротока, создаваемого под давлением  $P_{ж}$  в емкости 2, заполненной жидкостью 3, с соплом 4 диаметром  $d_{con}$  и используемого для передачи оптического сигнала 5.

Гидроструйный поток в виде цельной немодулированной струи диаметром  $d_{cmp}$ , подаваемый фронтально (рис. 1а) и или под углом (рис. 1б) к поверхности и обтекающий ее, является частью оптического измерительного канала измерителя 6, представляющего волоконный лазерный низкокогерентный интерферометр. Контроль смещений изделия 1 от его движений или съема материала при обработке осуществляется за счет отражения оптического потока его поверхностью.

Используя уравнения Бернулли, пренебрегая потерями энергии при вытекании жидкости из емкости 1 через сопло 4 и действием силы земного притяжения для малой длины струи, выражение для

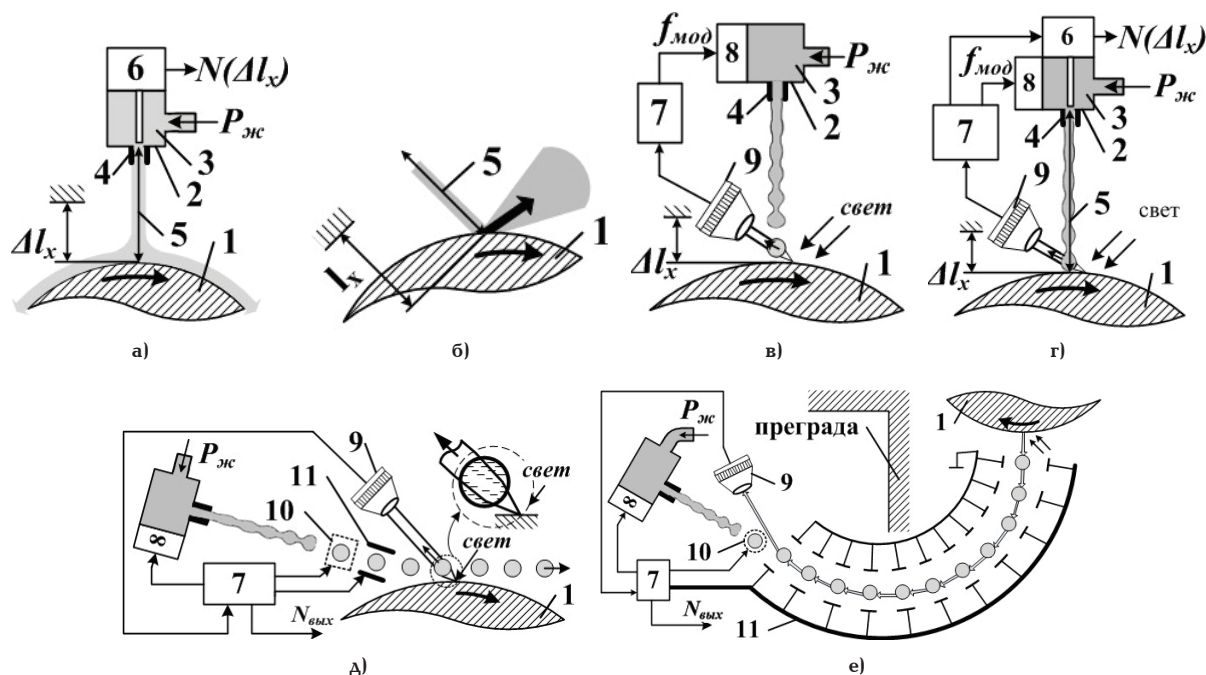


Рис. 1. Схемы СКОИС: с фронтальной (а) и угловой (б) подачами струй, на основе капельного потока (в), нераспавшейся части струи (г), с криволинейными капельными потоками без гидроконтакта (д) и с гидроконтактом (е) с поверхностью изделия

скорости жидкости  $v_{cmp}$ , зависящее от избыточно-го давление  $P_{ж}$  в емкости 1 и плотности жидкости  $\rho$ , принимает вид  $v_{cmp} = \sqrt{\frac{2P_{ж}}{\rho}}$ , где  $\rho$  — плотность жидкости. Давление струи на поверхность изделия  $F_{cmp}$ , определяемая выражением  $F_{cmp} = \frac{\pi \rho d_{cmp}^2 v_{cmp}^2}{4}$ , не должно превышать 3 Н, как для приборов активного контроля. И тогда можно записать [11]

$$v_{cmp} = \frac{1,95}{d_{cmp} \sqrt{\rho}}$$

При подаче моногармонического сигнала с частотой  $f_{mod}$  системой управления 7 на излучатель 8 в направленном на движущееся изделие 1 гидропотоке возникает режим ВКР струи с появлением нераспавшейся ее части и монодисперсного когерентного капельного потока. Размеры капель могут быть до  $\approx 1000$  мкм, их сферичность и однородность по размеру не хуже 0,5 % и 0,1 % соответственно [3].

Нераспавшаяся часть струи, длина которой  $l_{нчс}$  определяется моментом достижения амплитудой возмущения значения, равного радиусу струи  $r_{cmp}$ , имеет периодический ряд бегущих волн с длиной  $\Lambda_{cmp}$  возрастающих утолщений и уменьшающихся перешейков соответственно. Каждое утолщение к концу струи вырастает до отрывающейся капли диаметром  $d_{кан}$ , выполняющей функцию микрообъектива для схемы на рис. 1в.

Режим ВКР зависит от многих факторов, в частности, скорости истечения  $v_{cmp}$ , частоты генератора  $f_{mod}$  (с возможным наличием резонансных частот), амплитудой колебаний, вязкости  $\eta$  и др. И формулы для расчета значений  $l_{нчс}$ ,  $\Lambda_{cmp}$ ,  $v_{кан}$  и  $d_{кан}$  имеют вид [3, 4]:

— длина нераспавшейся части струи  $l_{нчс}$

$$l_{нчс} = \frac{v_{cmp}}{\gamma_m} \ln \left[ \frac{r_{cmp}}{\delta_0} \right] \approx 1,03 We^{0,5} \ln \left[ \frac{r_{cmp}}{\delta_0} \right], \quad (1)$$

— длина бегущих по струе волн  $\Lambda_{cmp}$

$$\Lambda_{cmp} = \frac{\pi d_{cmp}}{2k_m} = \left[ 1 - \frac{2\sigma}{\rho \cdot r_{cmp} \cdot v_{cmp}^2} \right] \approx 2,2 d_{cmp}, \quad (2)$$

— диаметр формируемых капель  $d_{кан}$

$$d_{кан} = 1,145 d_{cmp} (2\pi/k_m)^{0,33} \approx 2 d_{cmp}, \quad (3)$$

— скорость отрывающихся капель  $v_{кан}$ :

$$v_{кан} = v_{cmp} \left[ 1 - \frac{2\sigma}{\rho \cdot r_{cmp} \cdot v_{cmp}^2} \right], \quad (4)$$

где  $We = \frac{\rho v_{cmp}}{\sigma}$  — число Вебера,  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $\gamma_m$  — максимальное значение инкремента неустойчивости;  $\rho$  — плотность жидкости;  $k_m$  — максимальное значение безразмерного волнового числа.

Согласно теории Рэлея, минимальную длину  $l_{нчс}$  не более нескольких миллиметров струя имеет при максимальном значении инкремента неустойчивости  $\gamma_m$ , которого он достигает при волновом числе  $k_m = 0,697$  [4].

Отдельная подлетающая (рис. 1е) капля или в сочетании с ранее упавшей и растекающейся (рис. 1д) каплей в определенные дискретные моменты времени выполняют для поверхности изделия 1 роль микрообъектива. Тогда при синхронизации работы регистратора 9 с таким микрообъективом по этим моментам времени при внешнем импульсном освещении можно осуществить фоторегистрацию подобно стробоскопу и измерение шага и высоты неровности поверхности изделия 1, реализуя работу СКОИС в режиме импульсного капельного микроскопа наблюдения в методе светового/теневого сечения.

Введение в области отрыва капли от модулированной струи последовательно расположенных заря-

жающего 10 и отклоняющего 11 устройств (рис. 1д), позволяет соответственно придавать движущейся капле в ее автономном полете электрический поверхностный заряд  $q_e$ , а потом, управляя системой управления 7 уровнем сигнала  $U_{омк}$ , задавать вектор ее движения. Для подобной работы многоэлементного отклоняющего устройства 11 появляется возможность создать криволинейную траекторию движения капельного потока с обходом преграды.

Отрыв капли от струи приводит к колебаниям ее формы, а частота  $\omega_p$  в зависимости от полученного заряда  $q_e$  [3] для невязкой жидкости имеет вид:

$$\omega_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p(p-1)}{\rho R_d^3} \left[ (p+2)\sigma - \frac{q_e^2}{16\pi^2 \epsilon_0 R_d^3} \right]}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_0$  — проницаемость вакуума,  $p$  — номер гармоники. Управлением значением этого заряда  $q_e$  можно собственную частоту  $\omega_p$  уменьшать до нуля.

**3. Передача света гидротоками для осуществления измерений.** Для измерений смещений изделия и неровностей его поверхности важно понимать особенности передачи света формируемыми гидротоками, которые обсуждаются далее в данном разделе.

**3.1. Особенности передачи света при измерении смещений поверхности изделия.** Исследования гидродинамики струй показывают, что при фронтальном поливе цельной немодулированной струей изделия 1 (рис. 2а) возле преграды всегда возникают области течения I, II и III (рис. 2б); области свободной затопленной струи, градиентного течения в зоне разворота струи, а также пристенной струи [15, 16]. При прохождении высококогерентного излучения через область II градиентного течения существенно уменьшается его длина когерентности, что не позволяет использовать лазерные высококогерентные интерферометры для подобных задач, обуславливая применение в качестве измерителя б в одном из вариантов волоконных низкокогерентных интерферометров с циклическим режимом измерений. Такие устройства, имея обычно небольшой диапазон измерений  $\approx 10$  мм, могут работать с турбулентной гидроструей и/или шероховатой поверхностью изделия, определяя ее текущее положение с погрешностью измерений не хуже  $\approx 0,5 - 1$  мкм.

Так, работа измерителя б (рис. 1а, г), реализованного с участием подобного волоконного низко-

когерентного интерферометра [17, 18], основана на применении излучателя с гауссовой спектральной

плотностью мощности  $S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\Delta\omega)^2} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2(\Delta\omega)^2}\right)$ , где  $\omega_0$  и  $\Delta\omega$  — центральная длина волны и ширина спектра излучателя соответственно. При этом формула для интенсивности интерферирующих оптических потоков имеет вид

$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{(l_{он} - l_{rc})^2}{2l_{кор}^2}\right) \cos[k(l_{он} - l_{rc})]$ , где  $l_{он}$  — разность длин плеч опорного канала, созданного в измерителе б,  $l_{rc}$  — длина гидроструи, направленной на поверхность изделия 1,  $l_{кор}$  — длина когерентности излучателя,  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  — центральная длина волны излучателя.

Определение положения максимума аналогично измерениям «по огибающей» сигнала, описываемому выражением  $A(z) = A_0 \exp\left(\frac{(l_{он} - l_3)^2}{2l_{кор}^2}\right)$  и соответствует измерениям «по фазе» интерференционного сигнала и цифрового выходного кода  $N(\Delta L_x)$ , созданного с учетом двойного хода луча:  $N(\Delta L_x) = 2k_{инт} \Delta L_x / \lambda$ , где  $k_{инт}$  — коэффициент интерполяции периода интерференционной картины.

Таким образом, измеритель б может работать в двух режимах: «по огибающей» — «быстрые, но грубые» измерения, «по фазе» — «медленные» со временем измерения для одного канала не хуже 100 мс [17], но «точные» измерения.

**3.2. Особенности передачи света при измерении неровностей поверхности изделия.** Этот режим измерений основан на осуществлении метода светового/теневого сечения, в котором поверхность изделия освещается под углом  $45^\circ$  узким световым потоком, линией или светотеневой границей (в дальнейшем — светотеневая линия), формируемым внешним освещением с передачей его для регистрации и измерения.

При этом микроскопом наблюдения является капельный микроскоп, использующий каплю(и) в качестве оптических элементов микрообъектива. Его характеристики зависят от передачи света для разных положений в пространстве каплей и поверхности в следующих случаях: 1) капли, подлетающей к поверхности, 2) последней капли нераспавшейся струи, касающейся поверхности, 3) упавшей и растекающейся капли, 4) сочетания подлетающей

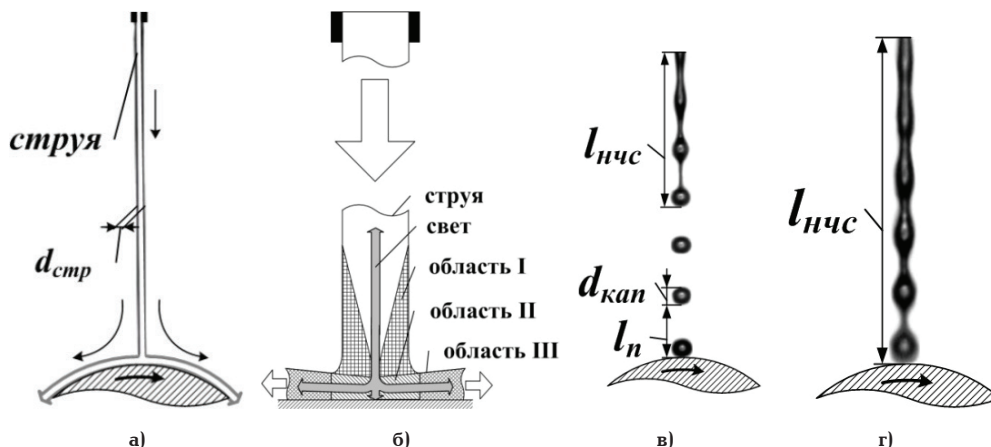


Рис. 2. Гидротоки СКОИС: немодулированная струя, направленная фронтально на изделие и растекающаяся по поверхности (а) и ее структура (б); модулированные струи, включающие нераспавшуюся часть струи с капельным потоком (в) и без него (г)

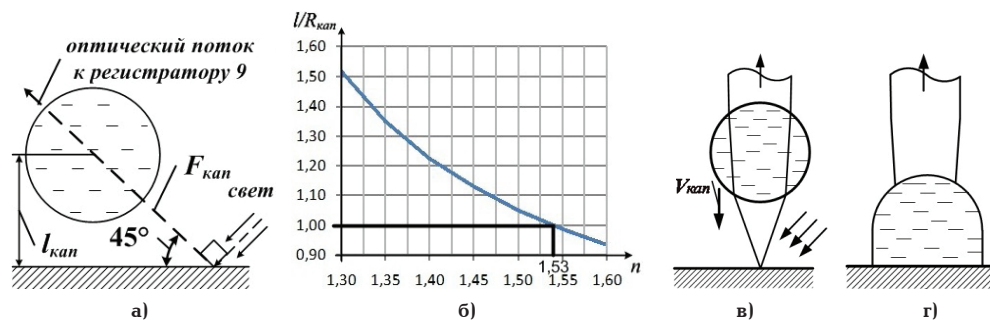


Рис. 3. Оптические схемы в процессе измерения неровности поверхности изделия: при боковом освещении и совпадении фокуса капли с уровнем поверхности изделия (а), график зависимости положения центра капли от показателя преломления  $n$  жидкостей (б), ход оптических потоков при вертикальной регистрации (в) и для растекающейся капли (г)

и упавшей ранее каплей. Эти особенности рассмотрены далее.

**3.2.1. Передача света каплей, подлетающей к поверхности изделия.** Этот случай соответствует моменту времени, когда фокус подлетающей к изделию шаровидной капли лежит на уровне поверхности. Тогда парааксиальная область капли, образуя часть поверхности фокусирующей линзы, передает изображение светотеневой линии для регистрации и измерения. Для этого момента важно знать зазор между центром капли и поверхностью  $l_{\text{кан}}$  в зависимости от показателя преломления  $n$ , стремясь определить, будет ли она подлетать к поверхности, начнет касаться ее или уже начнет растекаться.

В соответствии с оптической схемой (рис. 3а) и с учетом  $45^\circ$ -го угла падения, формулы для фокуса капли  $F_{\text{ш}}$  получим выражение для зазора

$$l_{\text{кан}} = F_{\text{кан}} \cos 45^\circ = \frac{0,35r_{\text{кан}} \cdot n}{(n-1)} \quad \text{и, соответственно,} \quad \frac{l_{\text{кан}}}{r_{\text{кан}}} = \frac{0,35n}{(n-1)}$$

Для полученного выражения построен график (рис. 3б), согласно которому для водной капли ( $n=1,33$ ) поверхность изделия находится в ее фокусе при  $\frac{l_{\text{кан}}}{r_{\text{кан}}} \approx 1,5$ , для жидкости с  $n = 1,53$  (гвоздичное или кедровое масла) этот момент соответствует касанию капли поверхности изделия, а при  $n > 1,53$  — процессу растекания.

**3.2.2. Передача света последней формирующейся каплей нераспавшейся струей при касании поверхности изделия.** Достоинство данного случая заключается в существенно большей универсальности за счет измерений как смещений изделия, так и неровности его поверхности. В момент касания поверхности длина нераспавшейся струи  $l_{\text{нчс}}$  равна (рис. 2г) расстоянию до поверхности изделия с расположением на ней фокуса последней формирующейся на струе капли. Форма ее близка к шару, а искажения при передаче изображения, вызванные ее несферичностью, могут быть скомпенсированы последующей программной обработкой.

Как следует из п. 3.2.1, описанный случай соответствует использованию жидкости с  $n \approx 1,53$ , т.к. в ином случае между каплей и поверхностью изделия будет зазор, препятствующий реализации гидроструйного интерферометрического способа измерения смещений изделия [11].

**3.2.3. Особенности передачи света каплей, растекающейся по поверхности изделия.** Передача света в этом случае предназначена только для вертикальных освещения и регистрации с возмож-

ностью измерения только лишь шага неровностей поверхности изделия. Это вызвано возникновением многочисленных переотражений в растекшейся капле при боковом освещении со сформированной светотеневой линией, практически исключающей возможность четкой регистрации ее изображения.

Процесс растекания капли жидкости, упавшей на поверхность изделия, зависит от скорости падения, которую можно условно разбить на три диапазона: низко-, средне- и высокоскоростной удар.

При низкоскоростном ударе кинетическая энергия меньше сил поверхностного натяжения и преобладают капиллярные процессы взаимодействия с поверхностью изделия [7] с возможностью появления колебаний формы. Формула для скорости движения  $v_{\text{нсу}}$  линии трехфазного контакта жидкость — воздух — поверхность имеет вид 
$$v_{\text{нсу}} = \frac{1}{2} [1 - \exp(-at^b)]^{\frac{1}{2}} \cdot abt^{b-1} \exp(-at^b),$$
 где  $a$  и  $b$  — безразмерные коэффициенты. На рис. 4 а-л приведены фотографии, демонстрирующие характер растекания и установления равновесных форм каплей воды и трансформаторного масла, упавших со скоростью  $v_{\text{кан}} = 11 \cdot 10^{-2}$  м/с на угольную поверхность [7].

Как следует из [8], со значений  $\approx 30 - 100$  м/с ударяющейся капле начинают проявляться ударные волны и волны разрежения, кумулятивная струя, образовываться и схлопываться кавитационные пузыри (рис. 4 м-р). Это неизбежно приведет к снижению качества передаваемого изображения поверхности изделия. И для исключения этих нелинейных оптических явлений с учетом небольшого запаса можно принять максимальное значение скорости удара капли равным  $v_{\text{max}} \approx 15$  м/с.

Переходом от низко- к среднескоростному удару с повышением быстродействия можно считать начало преобладания кинетической энергии капли над капиллярными процессами взаимодействия с поверхностью изделия. При этом на выдавливание нижней части капли (рис. 4 с-ф), равной  $h_c = r_{\text{кан}}/3$ , до образования ею полуэллипсоида уходит время 
$$t_{\text{кан}} = \frac{h_{\text{кан}}}{v} = \frac{r_{\text{кан}}}{3v} \quad [14].$$
 В этом есть общее с результатами экспериментов с каплей вязкой жидкости диаметром 3,6 мм, падающей со скоростью 0,77 м/с со временем  $t_{\text{кан}} \approx 0,7$  мс [19]. Таким образом, скорость падающей капли, соответствующей среднескоростному удару с минимальным временем растекания и передачей изображений без искажений, вызванных от паразитных кавитационных эффектов, находится в диапазоне от  $\approx 0,75$  до  $\approx 15$  м/с.



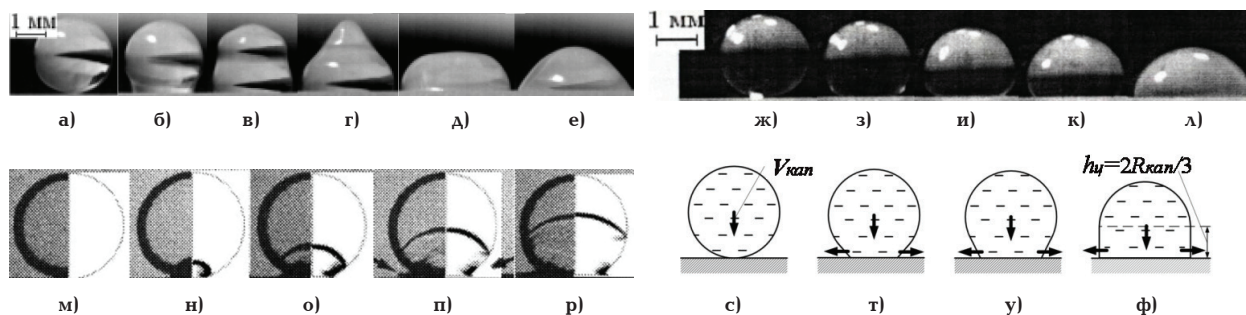


Рис. 4. Форма капель жидкости после удара с преградой:  
 (а-е) — удар капли диаметром 3 мм дистиллированной воды со скоростью 0,11 м/с  
 с текущим временем: 0 мс, 2 мс, 4 мс, 6 мс, 20 мс, 26 мс;  
 (ж-л) — удар капли диаметром 1,83 мм трансформаторного масла со скоростью 0,11 м/с  
 с текущим временем: 1,25 мс, 2,5 мс, 3,75 мс;  
 (м-р) — удар капли воды диаметром 10 мм со скоростью 110 м/с;  
 (с-ф) — схема формирования полуэллипсоида из шаровидной летящей капли

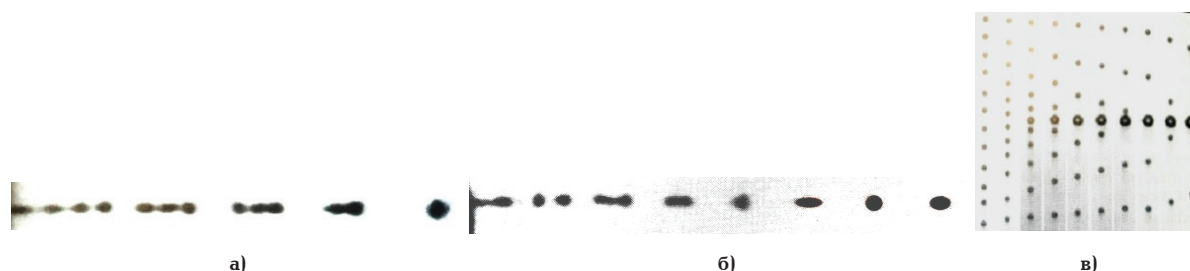


Рис. 5. Фото движения капель при их слиянии (пакетировании): по две (а), по три (б), 12 капель в одну большую (в)

3.2.4. Особенности передачи света при синхронизации подлетающей капли и капли, упавшей ранее и растекающейся по поверхности изделия. Данная комбинация предполагает синхронизацию пространственного положения летящей и упавшей ранее капли. Особенности передачи света для этого случая в основном определяются особенностями передачи света капли, растекающейся по поверхности, представленными выше.

**4. Управление параметрами гидропоточков.** Широкие возможности СКОИС могут быть реализованы за счет управления такими параметрами гидропоточков, как длина нераспавшейся струи  $l_{нрс}$ , диаметр струи  $d_{стр}$ , диаметр капли  $d_{кан}$ , отклонение струи и траектории движения капель, рассмотренных далее.

**4.1. Управление длиной нераспавшейся струи  $l_{нрс}$ .** Согласно выражению (1), управление этим параметром может быть осуществлено, например, за счет изменения частоты модуляции  $f_{мод}$ , скорости струи  $v_{стр}$  и др.

**4.2. Управление диаметром струи и размерами капель.** Изменения диаметра струи  $d_{стр}$  в СКОИС могут быть востребованы для изменений её давления на поверхность изделия или при изменении размеров гидроконтakta. При осуществлении этого для цельной немодулированной турбулентной струи может использоваться регулируемая форсунка [20].

Потребность регулировки разрешения капельного микроскопа за счет изменения фокусного расстояния  $F_{кан}$  капель обуславливает необходимость регулировки диаметра капель и поиска решений, позволяющих обойти зависимость диаметра капли от диаметра струи в результате ее ВКР согласно выражению (2)  $d_{кан} \approx 2d_{стр}$ . Одним из таких альтернативных способов может быть введение модуляционных эффектов ВКР струй, приводящих

к слиянию (пакетированию) в одну каплю из одного или нескольких капельных потоков, например, из двух (рис. 5а), из трех (рис. 5б) и даже из 12 капель (рис. 5в).

**4.3. Управление отклонением струи и траекторией движения капель.** Как показано в [21], отклонение струй возможно в небольших пределах, не более  $\approx 1,0$  мм, при использовании в СКОИС магнитных жидкостей.

Стремление к увеличению этого значения приводит к срыву устойчивого течения гидропотока с переходом к синусоидальным и даже «хлыстообразным» движениям конца струи.

Более перспективной может быть реализация криволинейной траектории движения капель при их зарядке. И для этого случая произведен расчет минимального радиуса  $R_{мин}$ , основанный на определении радиуса правильного многоугольника с числом сторон  $s$ , каждая из которых фактически соответствует диаметру одинаковых капель  $L_{му} = d_{кан}$  при условии нулевого зазора между ними (рис. 6). Тогда значение  $R_{мин}$  можно считать средним арифметическим между вписанными и описанными окружностями для многоугольника.

Итак, оптический луч (рис. 6а), смещенный на  $\Delta l_{см}$  относительно главной оси шаровидной капли, входит в нее в точке А и, преломляясь на границе воздух — жидкость, следует к точке В, в которой выходит из жидкости капли в воздух и проходит через фокус в точке С.

Фигура ABCD близка к трапеции, но, немного упрощая, можно считать её прямоугольным треугольником ACD с двумя катетами [AC], [AD] и гипотенузой [DC]. И тогда для этих двух последних элементов, определяемыми как  $|AD| = \Delta l_{см}$  и  $|DC| = |DO| = |OC| = r_{кан} + F_{кан}$ , можно рассчитать

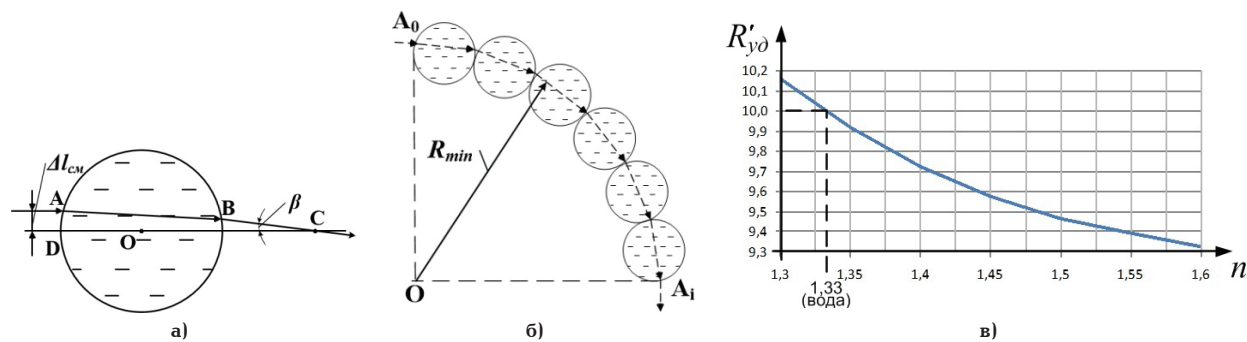


Рис. 6. Ход оптического луча через каплю (а), через набор капель (б) и график зависимости удельного (относительного) радиуса  $R'_{yd}$  от показателя преломления  $n$  жидкостей

$\sin \beta = \frac{|AD|}{|DC|} = \frac{\Delta l_{cm}}{(r_{кан} + F_{кан})}$  и далее  $\beta = \arcsin \frac{\Delta l_{cm}}{(r_{кан} + F_{кан})}$ , где  $r_{кан}$  и  $F_{кан}$  — радиус и фокус капли.

С учетом того, что для паракиальной области фокус сферической капли определяется формулой  $F_{кан} = \frac{r_{кан} \cdot n}{2(n-1)}$  и, приняв условие, что  $\Delta l_{cm} \approx r_{кан}/8$ , преобразуем выражение для угла  $\beta$  к следующему виду:

$$\beta = \arcsin \frac{r_{кан}}{8 \left( r_{кан} + \frac{r_{кан} \cdot n}{2(n-1)} \right)} = \arcsin \frac{1}{8 + \frac{n}{2(n-1)}}, \quad (6)$$

и при использовании воды ( $n_b = 1,33$ ) получим  $\beta \approx 5,7^\circ$ .

Число сферических капель  $s$ , необходимых для углового поворота на  $360^\circ$ , соответствует числу сторон равностороннего многоугольника, определяемого формулой  $s = 360^\circ/\beta$ . Искомое значение  $R_{min}$  можно рассчитать как среднее арифметическое радиусов вписанной  $R_{вн}$  и описанной  $R_{он}$  окружностей для этого многоугольника с длинами сторон  $l_c - R_{min} = \frac{R_{он} + R_{вн}}{2}$ , слагаемые которого определяют

ся как:  $R_{он} = \frac{l_{cm}}{2 \sin \frac{180^\circ}{s}}$  и  $R_{вн} = \frac{l_{cm}}{2 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{s}}$ . Как видно,

$R_{min}$  зависит от  $l_{cm}$ , и поэтому для удобства введем понятие удельного (относительного) радиуса, определяемого как отношение  $R_{min}$  к длине стороны  $l_{cm} - R'_{yg} = \frac{R_{min}}{l_{cm}}$ , выражение для которого с учетом тригонометрических формул в итоге примет вид:

$$R'_{yg} = \frac{1}{4 \sin \frac{180^\circ}{s}} + \frac{1}{4 \operatorname{tg} \frac{180^\circ}{s}} = \frac{1}{4 \sin \frac{\beta}{2}} + \frac{1}{4 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} = \frac{1 + \cos \frac{\beta}{2}}{4 \sin \frac{\beta}{2}} = \frac{1}{4} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{4}. \quad (7)$$

Используя ее вместе с выражением (1), на рис. 6а построен график зависимости  $R'_{yg}$  от показателя преломления жидкостей в диапазоне от 1,3 до 1,6, являющийся частью гиперболы. Так, для воды ( $n = 1,33$ ) значение  $R'_{yg} \approx 10$ , и это значит, что при диаметре капель 1 мм минимальный радиус поворота траектории движения капель составит  $\approx 10$  мм.

#### Заключение.

1. При измерении смещений поверхности изделий применению одномодового режима передачи

света ламинарной струей совместно с высококогерентным интерферометром препятствует появление области градиентного течения и разворота струи, возникающей вблизи поверхности обливаемого изделия.

Достижение этой цели возможно при использовании низкокогерентных интерферометров с циклическим режимом измерений.

2. Использование немодулированной струи позволяет измерять смещения изделия, модулированной струи в режиме ВКР, содержащей капельный поток, — неровности поверхности изделия, а применение нераспавшейся части струи обладает большей универсальностью, позволяя измерять оба параметра.

3. Функциональные возможности СКОИС позволяют управлять диаметрами струи  $d_{cmp}$  и капли  $d_{кан}$ , длины нераспавшейся струи  $l_{нчс'}$  отклонением струи и траекторией движения капель.

Использование капельного потока при заряджании и электрическом управлении позволяет сформировать криволинейную траекторию движения капель с соответствующей траекторией передачи света с обходом препятствия.

Для СКОИС изменение фокусного расстояния  $F_{кан}$  возможно за счет изменения диаметров формирующихся капель  $d_{кан}$  при слиянии (пакетировании) одной или нескольких капель в одну одного или нескольких капельных потоков.

4. Шаг и высота неровностей поверхности могут быть измерены при реализации метода светового/теневого сечения, в котором линзой микроскопа наблюдения является падающая капель. При использовании воды зона контроля попадает в фокус капли при условии  $\frac{l_{кан}}{r_{кан}} \approx 1,5$ , где  $l_{кан}$  и  $r_{кан}$  — расстояние до поверхности от центра капли и радиус капли соответственно.

5. Применение растекшейся по поверхности изделия капли для метода светового/теневого сечения осложняется возможными многократными переотражениями оптических потоков, проходящих через нее.

6. Скорость падающей капли соответствующей среднескоростному удару с минимальным временем растекания и передачей изображений без искажений, вызванными паразитными кавитационными эффектами, должна находиться в диапазоне от  $\approx 0,75$  до  $\approx 15$  м/с.

#### Библиографический список

1. Пат. 2622988 Российская Федерация, МПК А 61 В 1/005. Эндоскоп с изменяемой оптической силой на основе техноло-

- гии жидкой линзы / Гупта А., Шнелл У., Иган У. [и др.]; заявл. 01.12.11; опубл. 21.06.17, Бюл. № 18.
2. Пат. 2149434 Российская Федерация, МПК G02B26/06, G02B3/14. Адаптивное оптическое устройство на основе жидкой линзы / Безуглый Б. А., Шепеленок С. В., Тарасов О. А.; заявл. 14.04.98; опубл. 20.05.00, Бюл. № 14.
3. Аметистов Е. В., Дмитриев А. С. Монодисперсные системы и технологии: моногр. М.: МЭИ, 2002. 390 с.
4. 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.
5. Безруков В. И. Научно-технические основы и аппаратное обеспечение автоматизированной электрокапельной маркировки изделий: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2003. 563 с.
6. Левченко Ю. А. Управляемый метод электрокапельной струйной нанесения технологических жидкостей на химические нити: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 194 с.
7. Архипов В. А., Палеев Д. Ю., Патраков Ю. Ф. [и др.]. Определение краевого угла смачивания угольной поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 23–28.
8. Чижов А. В., Шмидт А. А. Высокоскоростной удар капли о преграду // Журнал технической физики. 2000. Т. 70, вып. 12. С. 18–27.
9. Шутов А. А. Форма капли в постоянном электрическом поле // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, вып. 12. С. 15–22.
10. Пат. 2612349 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/02. Струйный способ контроля линейных размеров изделий / Леун Е. В.; заявл. 23.10.15; опубл. 07.03.17, Бюл. № 7.
11. Леун Е. В. Гидроструйный интерферометрический способ контроля размеров изделий // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 4. С. 101–109.
12. Леун Е. В., Сысоев В. К., Шалай В. В., Ломонова Е. Е., Шаханов А. Е., Вятлев П. А. Гидроструйный способ контроля параметров технологических процессов в ракетно-космической технике // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 9 (69). DOI:10.18698/2308-6033-2017-9-1675.
13. Леун Е. В. Интеллектуальный токарный резец с приборами активного контроля температуры зоны резания, размеров изделия и параметров формы его поверхности // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 87–93.
14. Леун Е. В. Электрокапельный микроскоп для активного контроля неровностей поверхности изделия // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 4. С. 39–47.
15. Бильский А. В. Гидродинамическая структура осесимметричной импактной струи: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2006. 184 с.
16. Пахомов М. А., Терехов В. И. Интенсификация турбулентного теплообмена при взаимодействии туманообразной осесимметричной импактной струи с преградой // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, № 1. С. 119–131.
17. Волков П. В., Горюнов А. В., Лукьянов А. Ю. [и др.]. Измерение профиля поверхности протяженных асферических объектов // Нанопластика и наноэлектроника: материалы XXI Междунар. симп., 13–16 марта 2017 г. Н. Новгород. 2017. Т. 1. С. 379–380.
18. Иванов В. В. Развитие методов низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2005. 154 с.
19. Майков И. Л., Директор Л. Б. Численная модель динамики капли вязкой жидкости // Вычислительные методы и программирование. 2009. Т. 10 (1). С. 148–157.
20. Пат. 26440228 Российская Федерация, МПК В 23 Q 11/10. Регулируемая форсунка / Корнаков Д. С., Сладков В. Ю., Алёшичева Л. И., Дудина Ю. В.; заявл. 16.03.10; опубл. 20.01.12, Бюл. № 2.
21. Диканский Ю. И., Борисенко О. В., Закинян А. Р. Неустойчивость струи магнитной жидкости в перпендикулярном магнитном поле // Фундаментальные исследования. 2013. № 1. С. 375–378.

**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

#### Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 02.11.2018 г.

© Е. В. Леун