

# ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО, МАГНИТНОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЕЙ МЕТОДОМ ВИСЯЩЕЙ КАПЛИ. ЧАСТЬ 1

В статье рассматриваются принцип действия и основные компоненты струйно-капельных оптических измерительных систем, работающих на основе метода висящей капли для контроля напряженностей электрического поля, магнитного поля и гравитационного поля.

Для осуществления чувствительности висящей капли к электрическому или магнитному полям предложено ее электростатически заряжать или создавать ее из магнитной жидкости, а ее масса позволяет чувствовать изменения гравитационного поля. Использование магнитных жидкостей в качестве основы висящей капли наиболее многофункционально для измерений напряженностей электрического поля, магнитного поля и гравитационного поля.

Рассматривается реализация нулевого метода измерений с использованием висящей капли в качестве устройства сравнения, нуль-органа, воспринимающей разность воздействий измеряемого и опорного(ых) поля(ей) на уровне квазинулевых трехкоординатных смещений. Они измеряются высокоточными оптическими способами измерений. Анализируются различные варианты современных оптических систем измерений.

**Ключевые слова:** висящая капля, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, напряженность гравитационного поля, магнитная жидкость, магнитометр, гравиметр, матричный видеорегистратор.

**Введение.** В исследованиях космического пространства и небесных тел возникает потребность измерений напряженности электрического поля (НЭП), напряженности магнитного поля (НМП) и напряженности гравитационного поля (НГП). Контроль НЭП и НМП также используется при проверках элетромагнитной совместимости узлов на разных стадиях создания космических аппаратов (КА).

Контроль геомагнитных параметров Земли является важной задачей с возможностью использования их для навигации и локации КА. Поэтому прогресс в создании универсальных методов и средств измерения НЭП, НМП и НГП является актуальной задачей.

Измерениям этих параметров посвящено много научных публикаций [1–6], и активность таких исследований обусловлена бурным развитием микро-, оптоэлектроники и других направлений технической физики.

В авторских работах [7–9] обсуждались вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС) для измерения НЭП. В основе их работы лежат две идеи:

1) создание направленного потока заряженных капель, траектория движения которых чувствительная к воздействию НЭП, как в кинескопе телевизора;

2) использование капель в качестве криволинейных отражателей для стробоскопического триангуляционного оптического измерителя этих смещений.

Однако такие СКОИС сложны в реализации, имеют ограничения функциональных возможностей за счет контроля только лишь НЭП и ограничения чувствительности по следующим причинам:

— из-за предельного значения заряда капель, определяемого условием Рэллея, связанного с возможным вынужденным их дроблением;

— импульсного режима работы измерительной системы;

— осуществления триангуляционных измерений с необходимостью измерений поперечных смещений лазерного луча относительно его оси, обладающего существенно меньшей разрешающей способностью по сравнению с т.н. «продольными» измерениями смещений.

Совершенствование СКОИС за счет устранения или минимизации этих недостатков обуславливает поиск новых технических решений. И одно из направлений может быть связано с использованием неподвижных капель: висящей (висячей) на капилляре или лежащей на поверхности, например, магнитной жидкости (МЖ), чувствительной к НЭП, НМП и НГП с высокоточным определением ее положения.

Применение метода висящей капли наиболее распространено в тензиометрии для измерения поверхностного или межфазного натяжения жидкостей и в смежных областях [10–12]. И поэтому разработка и исследование многофункциональных СКОИС для измерений НЭП, НМП и НГП на основе метода висящей капли является актуальной задачей. Рассмотрение таких СКОИС в открытой печати ранее не было представлено. Данная работа направлена на устранение этого недостатка.

Данная статья является началом серии статей, рассматривающих принцип действия и основные компоненты СКОИС на основе висящей капли.

**1. Основы принципа действия и устройство СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП.** В разделе обсуждаются принцип действия СКОИС с висящей каплей для контроля НЭП, НМП и НГП и одно из устройств, реализующих ее.

*1.1. Основы принципа действия СКОИС контроля НЭП, НМП и НГП.*

В основе данного способа измерений лежит возможность использования в качестве чувствительного элемента к постоянным или медленно меняющимся НЭП, НМП и НГП висящей капли с одновременным высокоточным оптическим контролем ее смещений. Для измерений используются следующие способности:

- висящая капля с электростатическим зарядом  $q_{\text{кап}}$  чувствительна к электрическому полю  $E$ ;
- висящая капля из МЖ чувствительна к магнитному полю  $H$ ;
- висящая капля обладает массой  $m_{\text{кап}}$  и поэтому чувствительна к гравитационному полю  $G$ .

В процессе измерений на висящую каплю помимо входных измерительных параметров  $E_{\text{изм}}$ ,  $H_{\text{изм}}$  и  $G_{\text{изм}}$  оказывают влияние компенсирующие воздействия опорными (мерами) параметрами: электрическим полем  $E_{\text{он}}$ , если висящая капля заряжена, и/или магнитным полем  $H_{\text{он}}$ , если висящая капля создана на основе МЖ. Так, итоговое смещение пытаются свести к квазиуловому минимальному разрешимому смещению на уровне порога чувствительности. Этим реализуют нулевой метод измерений, в котором висящая капля, выполняет функцию трехкоординатного устройства сравнения (нульоргана, компаратора) разности между входными и опорными параметрами. Принимается квазистатический режим работы СКОИС с низкой, стремящейся к нулю  $v_{\text{кап}} \rightarrow 0$  скоростью движения висящей капли.

Выражение для векторного результата такого сравнения с использованием квазиулового вектора  $\Delta l_{\text{р}\Sigma}$  можно записать в общем виде:

$$\overline{\Delta l(E_{\text{изм}}, H_{\text{изм}}, G_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}}, H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}} \approx 0, \quad (1)$$

где  $\overline{\Delta l(E_{\text{изм}}, H_{\text{изм}}, G_{\text{изм}})}$  — смещение висящей капли при воздействии измеряемых параметров НЭП; НМП и НГП,  $\overline{\Delta l(E_{\text{он}}, H_{\text{он}})}$  — смещение висящей капли при общем воздействии опорных НЭП и НМП;  $\overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}$  — квазиуловый вектор, определяемый разрешающей способностью измерений трехкоординатных смещений висящей капли.

На данном этапе исследований СКОИС на основе висящей капли из-за сложности учета всех физических параметров и составляющих погрешности примем, что порог чувствительности измерений  $\Delta l_{\text{пор}\Sigma}$  равен разрешающей способности  $\Delta l_{\text{р}\Sigma}$  средств

измерений трехкоординатных смещений висящей капли:  $\Delta l_{\text{пор}\Sigma} = \Delta l_{\text{р}\Sigma}$ , используя в дальнейшем второй параметр.

Соответственно, при независимых воздействиях измеряемых параметров выражение (1) можно разложить на три формулы:

при измерениях НЭП:

$$\overline{\Delta l(E_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}; \quad (2)$$

при измерениях НМП (в режиме работы магнитометра):

$$\overline{\Delta l(H_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}; \quad (3)$$

при измерениях НГП (в режиме работы гравиметра):

$$\overline{\Delta l(G_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}, \quad (4)$$

где  $\overline{\Delta l(E_{\text{изм}})}$  и  $\overline{\Delta l(E_{\text{он}})}$  — смещения висящей капли с электростатическим зарядом  $q_{\text{кап}}$  при воздействии на нее измеряемого  $E_{\text{изм}}$  и опорного  $E_{\text{он}}$  электрических полей,  $\overline{\Delta l(H_{\text{изм}})}$  и  $\overline{\Delta l(H_{\text{он}})}$  — смещения висящей капли МЖ при воздействии на нее измеряемого  $H_{\text{изм}}$  и опорного  $H_{\text{он}}$  магнитных полей,  $\overline{\Delta l(G_{\text{изм}})}$  — смещения висящей капли от воздействия измеряемого гравитационного поля  $G_{\text{изм}}$ .

Длина вектора  $\Delta l_{\text{р}\Sigma}$  определяется геометрической суммой трехкоординатных составляющих  $\Delta l_{\text{р}x}$ ,  $\Delta l_{\text{р}y}$  и  $\Delta l_{\text{р}z}$ , принимая условие нормального распределения каждой из них:

$$\Delta l_{\text{р}\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{\text{р}x}^2 + \Delta l_{\text{р}y}^2 + \Delta l_{\text{р}z}^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta l_{\text{р}x}$ ,  $\Delta l_{\text{р}y}$  и  $\Delta l_{\text{р}z}$  — разрешающие способности при измерении смещений висящей капли по трем осям ОХ, ОУ и ОZ.

Висящая капля является объемным телом, поэтому для исключения влияния ее размера на результат нужно осуществлять измерения смещений в двух противоположных точках или с учетом дополнительной опорной координаты. Тогда вместо одного измерения для каждой из трех осей ОХ, ОУ и ОZ будет два, позволяя записать (на примере измерений для оси ОХ):

$$\Delta l_{\text{р}x} = \sqrt{\Delta l_{\text{р}x1}^2 + \Delta l_{\text{р}x2}^2}. \quad (6)$$

С учетом этого уравнение (5) для трех координат можно переписать к виду

$$\Delta l_{\text{р}\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{\text{р}x1}^2 + \Delta l_{\text{р}x2}^2 + \Delta l_{\text{р}y1}^2 + \Delta l_{\text{р}y2}^2 + \Delta l_{\text{р}z1}^2 + \Delta l_{\text{р}z2}^2}, \quad (7)$$

которое при использовании одинаковых измерительных средств и равенства  $\Delta l_{\text{р}x1} = \Delta l_{\text{р}x2} = \Delta l_{\text{р}y1} = \Delta l_{\text{р}y2} = \Delta l_{\text{р}z1} = \Delta l_{\text{р}z2}$  можно преобразовать к новому выражению (на примере оси ОХ):

$$\Delta l_{\text{р}\Sigma} = \Delta l_{\text{р}x} \sqrt{6} \approx 2,45 \cdot \Delta l_{\text{р}x}. \quad (8)$$

Рассмотрение различных вариантов современных высокоточных оптических измерительных систем контроля смещений висящей капли с учетом полученных выражений будут рассмотрены далее.

*1.2. Устройство СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП.*

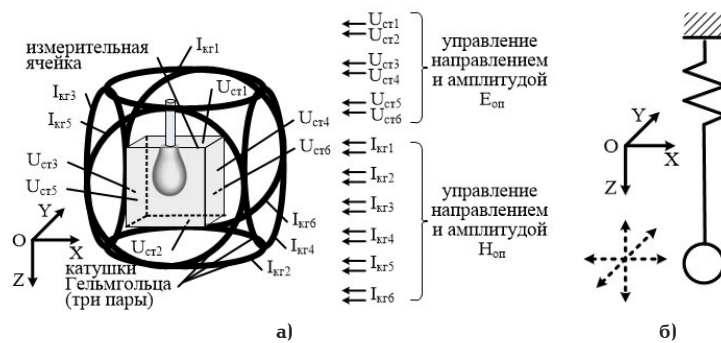


Рис. 1. Измерительная ячейка СКОИС с висящей каплей внутри пустотелого куба и трех пар катушек Гельмгольца (трехкоординатный измеритель смещений капли не показан)

В статье рассматривается вариант СКОИС, в котором измерительная ячейка (рис. 1а) представляет собой пустотелый куб с полупрозрачными металлизированными покрытиями, нанесенными на три его пары противоположных сторон (стенки) размером  $I_{ия}$ , формирующих три пары обкладок, сориентированных по осям  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ . Сверху к измерительной ячейке подходит тонкий капилляр, формирующий внутри нее с помощью управляемого дозатора (на рис. 1а не показан) из небольшого объема вытекшей жидкости, преимущественно МЖ, висящую каплю, подобно маятнику с возможностью углового отклонения.

Одно из направлений развития подобных исследований может быть связано с использованием в качестве чувствительного элемента маятника на подпружиненном подвесе (рис. 1б) с тремя степенями свободы за счет возможности квазинулевых смещений вдоль осей:  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ . На основе этого возможна группа технических решений, особенности которой будут рассмотрены в следующих авторских публикациях.

Подведение трех сигналов  $\Delta U_{on x'}$ ,  $\Delta U_{on y'}$  и  $\Delta U_{on z'}$  к трем парам противоположных металлизированных покрытий измерительной ячейки формирует внутри нее пропорциональное опорное электрическое поле  $E_{on}$ , состоящее из трех компонент  $E_{on x}$ ,  $E_{on y}$ ,  $E_{on z}$ . Выражение для  $E_{on}$  с учетом зависимости от  $\Delta U_{on}$  и длины стороны кубической измерительной ячейки  $I_{ия}$ , можно записать в следующем виде:

$$E_{on} = \frac{U_{on}}{I_{ия}} = \frac{1}{I_{ия}} \sqrt{\Delta U_{on x}^2 + \Delta U_{on y}^2 + \Delta U_{on z}^2} \quad (9)$$

Придание висящей капле электростатического заряда  $q_{кан}$  делает ее чувствительной к НЭП, а воздействие на нее трехкомпонентного опорного электрического поля  $E_{on}$  определяется силой Кулона  $F_{кул}$ :

$$F_{кул} = q_{кан} \cdot E_{on} = \frac{q_{кан}}{I_{ия}} \sqrt{\Delta U_{on x}^2 + \Delta U_{on y}^2 + \Delta U_{on z}^2} \quad (10)$$

Естественным ограничением для  $\Delta U_{on x'}$ ,  $\Delta U_{on y'}$  и  $\Delta U_{on z'}$  является напряжение пробоя, составляющее для воздуха  $U_{пр} \approx 20$  кВ/см.

Вокруг измерительной ячейки также расположены три пары соосных катушек Гельмгольца, сориентированных друг против друга, с осями каждой пары вдоль  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ .

Параметры таких катушек Гельмгольца могут быть следующими. В одной из экспериментальных установок [13] однородное магнитное поле вдоль одного из направлений создавалось в зазоре 60 мм между двумя параллельно расположенными катушками Гельмгольца, каждая из которых, имея сопротивление  $\approx 8$  Ом и индуктивность  $\approx 17,5$  мГн, создана намоткой 250 витков в форме кольца диаметром 120 мм проводом диаметром 0,9 мм. Катушки градуировались с использованием тесламетра РНУВЕ, формируя при проходящем в катушках токе 1 А НМП  $\approx 3$  кА/м (38 Э). Пропускаемый ток в экспериментах мог достигать 3 А.

В исследованиях [14] катушки Гельмгольца имели примерно близкие к вышеуказанным значения параметров. Так, каждая катушка имела внешний диаметр 122,5 мм, состоя из 390 витков провода диаметром 1 мм. И при пропускании тока 4 А НМП достигала 4 кА/м. Протекание токов  $I_{x1'}$ ,  $I_{x2'}$ ,  $I_{y1'}$ ,  $I_{y2'}$ ,  $I_{z1}$  и  $I_{z2}$  через вышеупомянутые катушки Гельмгольца приводит к формированию однородного магнитного поля  $H_{on}$  в пространстве измерительной ячейки 1, амплитуда и пространственное направление вектора которого определяется суперпозицией трех составляющих  $H_{on x}$ ,  $H_{on y}$ ,  $H_{on z}$ .

Взаимодействие МЖ с внешним магнитным полем можно описать следующим образом. МЖ является суперпарамагнетиком и проявляет свои магнитные свойства только при воздействии внешнего магнитного поля, не сохраняя остаточной намагниченности при его исчезновении. Взаимодействие с внешним магнитным полем проявляется не только в ориентации магнитных моментов частиц, но и во влечении, тяге частиц в область сильного поля.

Суммарный вектор притяжения частиц МЖ, притягивающий ее каплю и смещающий ее на вектор  $\Delta(H_{on})$ , обусловлен магнитной объемной силой  $F_{mar}$ :

$$F_{mar} = \mu_0 \cdot M(H) \cdot H_{on} \quad (11)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость,  $M(H)$  — намагниченность МЖ, зависящая от внешнего магнитного поля и являющаяся функцией НМП.

Функция  $M(H)$  является нелинейной (рис. 2) и может быть аппроксимирована для двух диапазонов значений НМП. При малых значениях  $H$ , не превышающих 5...7 кА/м, которые наиболее интересны для целей данных исследований, проявляется линейная связь между  $M$  и  $H$ :

$$M(H) = \chi H, \quad (12)$$

где  $\chi$  — начальная магнитная восприимчивость МЖ.

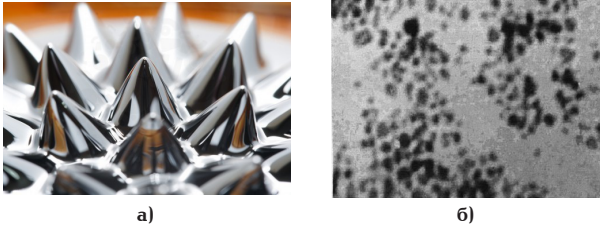


Рис. 2. Магнитная жидкость: пики на поверхности при воздействии внешнего магнитного поля [18], электронная фотография частиц [17]

При возрастании значений НМП, превышающих вышеуказанные значения, для известных экспериментально определенных кривых намагничивания МЖ, часть которых упомянута в [15], активно используется немного упрощенное, но достаточно точное выражение, связывающее  $M$  и  $H$  [15, 16]:

$$M(H) = \frac{M_s \cdot H}{H_m + H}, \quad (13)$$

где  $H_m$  — напряженность полунасыщения, т.е. значение НМП, при котором намагниченность МЖ равна половине намагниченности ее насыщения  $M = M_s/2$ .

В связи с тем, что НМП  $H_{on}$  зависит от трех пар протекающих токов  $I_{к11}-I_{к12}$ ,  $I_{к13}-I_{к14}$  и  $I_{к15}-I_{к16}$  (рис. 1а), в каждой из трех пар катушек Гельмгольца, расположенных в соответствии с осями ОХ, ОУ и ОZ:

$$H_{on} = k_{mag} \cdot I_{on} = k_{mag} \sqrt{\Delta I_{onx}^2 + \Delta I_{ony}^2 + \Delta I_{onz}^2}, \quad (14)$$

где  $k_{mag}$  — коэффициент пропорциональности НМП. Это позволяет записать следующее уравнение:

$$F_{mag} = \mu_0 M(H) H_{on} = \mu_0 M(H) k_{mag} \sqrt{\Delta I_{onx}^2 + \Delta I_{ony}^2 + \Delta I_{onz}^2}. \quad (15)$$

Выражение для силы тяжести, действующей на висющую каплю, с учетом системы координат СКОИС можно записать в следующем виде:

$$F_{тяж} = m_{кан} g = m_{кан} \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}, \quad (16)$$

где  $g_x$ ,  $g_y$  и  $g_z$  — три ортогональные компоненты силы тяжести относительно системы координат СКОИС.

**2. Жидкости для использования в СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП.** В соответствии с уравнениями (2)–(4) и принципом действия к жидкости, используемой для формирования висящей капли, предъявляются требования чувствительности к электрическому и/или магнитному полю, а также высокой отражающей способности.

Для измерения НЭП и НГП также могут использоваться обычные технические жидкости без магнитоуправляемых свойств, являясь фактически специальными чернилами. Так они представляют 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. Особенности использования различных жидкостей в СКОИС ранее уже были рассмотрены в [7–9].

Магнитные жидкости (МЖ) в природе не существуют, были созданы искусственно в середине 1960-х годов и обладают магнитоуправляемыми свойствами (рис. 2а). Основная особенность МЖ заключается в том, что она является суперпарамагнетиком из-за того, что, обладая высокой магнитной восприимчивостью, проявляет свои магнитные свойства только в присутствии внешнего магнитного поля и не сохраняет остаточной намагниченности при его исчезновении. В нулевом магнитном поле совокупность магнитных моментов отдельных наночастиц, составляющих МЖ, направлена произвольно, что в суперпозиции равно нулю.

Структура МЖ представляет взвесь в жидкой немагнитной среде (керосин, вода, толуол, минеральные и кремнийорганические масла и т.п.) микрочастиц размером около 10–15 нм ферро- и ферромагнетиков, например, из высокодисперсного железа, ферромагнитных окислов  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ , ферритов никеля, кобальта (рис. 2б) [17].

Высококачественные МЖ могут сохранять однородность в течение многих лет. Наиболее распространенными в России и странах СНГ являются следующие МЖ [15]: на основе керосина МК-21, МК-43, МК-52, МК-66, МК-72; на основе трансформаторного масла ММТр-10, ММТр-23, ММТр-44 и на основе воды МВ-4. У таких МЖ имеются следующие основные физические характеристики: плотность  $\rho$  (в  $kg/m^3$ ) меняется в диапазоне от 1037 (МВ-4) до 1650 (МК-72), изменения начальной магнитной восприимчивости  $\chi$  составляют от 0,1 (ММТр-10) до 4,6 (МК-72). В некоторых исследованиях используют МЖ на основе керосина с магнитной восприимчивостью  $\chi$ , достигающей 7,0 [14].

Намагниченность МЖ имеет явно выраженную нелинейную зависимость от внешнего магнитного поля  $M(H)$  (рис. 3). Также у МЖ из вышеупомянутого ряда (рис. 3) намагниченность насыщения  $M_s$  (в  $kA/m$ ) находится в диапазоне от 3,9 (МВ-4) до 72,5 (МК-72), а напряженность полунасыщения  $H_m$  (в  $kA/m$ ) изменяется от 15,4 (МК-66) до 61,0 (ММТр-10).

**3. Анализ возможностей высокоточных измерений отклонений висящей капли.** Современные высокоточные оптические способы определения смещений висящей капли или изменения ее формы можно условно разделить на три следующие группы, которые подробно рассмотрены далее.

**3.1. Измерение смещений висящей капли лазерными 2D или 3D сканерами.** Для данной группы принимается допущение о том, что коэффициент отражения МЖ и уровень оптического сигнала, отраженного от нее, достаточен для устойчивой работы сканеров. Их преимущество заключается в автоматическом сканировании, «ощупывании» объекта оптическим потоком и использовании симметричности висящей капли.

**3.1.1. 2D сканирование поверхности висящей капли триангуляционным методом.** В процессе измерений осуществляется линейное сканирование дискретными точками лазерного луча и определение двух координат каждой точки (рис. 4а). Дискретность сканирования для модели LLT 29xx-10/VL (с лазером голубого излучения) по оси ОХ достигает 1280 точек на профиль (10 мм), составляя  $\approx 7,8$  мкм (поперечная разрешающая способность), а оси ОZ разрешение не превышает 1,0 мкм (про-

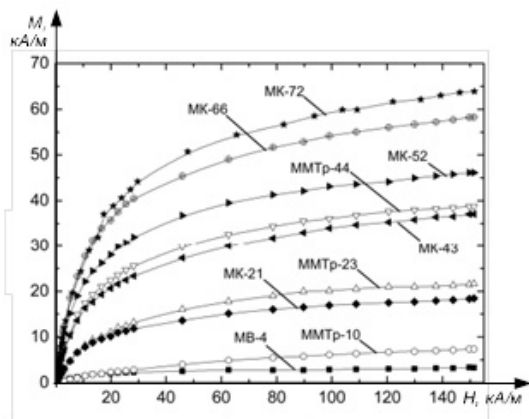


Рис. 3 Кривые намагничивания различных МЖ [15]

дольная разрешающая способность) [19]. Предполагается, что для контроля трехкоординатных смещений висящей капли потребуется два таких датчика: сканирующих ее вдоль осей  $OX$  и  $OZ$  с учетом ее калиброванной функции формы [10]. Тогда разрешающая способность при измерении трехкоординатных смещений висящей капли упрощенно определится по формуле (5):

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{1,0^2 + 1,0^2 + 7,8^2} \approx 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

3.1.2. 3D сканирование поверхности висящей капли триангуляционным методом. Так, 3D сканирующая система модели LLT30x0-25 (рис. 4б) [19] имеет следующие разрешающие способности:  $\Delta l_{px} = \Delta l_{py} = 7,8$  мкм вдоль осей  $OX$ ,  $OY$  и  $\Delta l_{pz} = 1,5$  мкм вдоль оси  $OZ$ . С учетом выражением (5) получаем

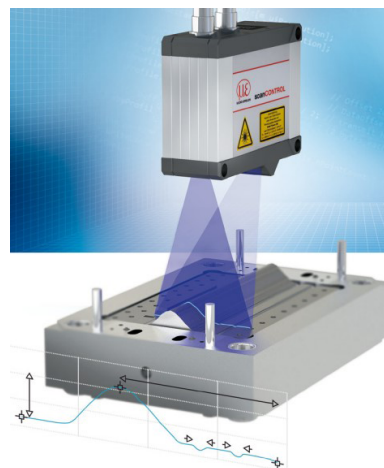
$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{7,8^2 + 7,8^2 + 1,5^2} \approx 11,13 \text{ мкм.}$$

Предполагается, что потребуется один такой датчик, сканирующий висящую каплю вдоль осей  $OX$  и  $OZ$  с учетом ее калиброванной функции формы [10].

3.2. Фронтальное многоточечное измерение смещений висящей капли при помощи однокоординатного измерения продольных смещений.



а)



б)

Рис. 4. Сканирование поверхности контролируемого объекта [19]: 2D сканирование (а), 3D сканирование (б)

Особенность данного подхода заключается в использовании поверхности висящей капли в качестве отражателей для оптического потока.

С учетом этого для расчетов разрешающей способности смещений висящей капли используется выражение (8).

Средства измерений данной группы рассмотрены далее, их общее количество составит 6 шт. На рис. 5 показана схема измерений смещений висящей капли на примере использования измерителей смещений  $I_{x1}$ ,  $I_{x2}$  и  $I_{z1}$ ,  $I_{z2}$  для двух осей  $OX$  и  $OZ$  соответственно. Процесс измерения включает процедуру поиска, определения максимального утолщения, «экватора» висящей капли.

3.2.1. Триангуляционный датчик смещений optoNCDT 2300-2DR [19] с синим лазером имеет разрешающую способность 30 нм в пределах диапазона измерений 2 мм. Для таких исходных данных значение  $\Delta l_{p\Sigma}$  составляет:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-9} = 73,5 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.2. Конфокальный датчик confocalDT IFS2407 [19] имеет разрешение 3 нм в пределах диапазона измерений 0,1 мм. И, так же как и ранее, используя формулу (16), получаем значение  $\Delta l_{p\Sigma}$

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 7,35 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.3. Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS имеет разрешающую способность 30 пм (согласно IMS5600) в пределах диапазона измерений 2,1 мм [19]. Тогда, с учетом формулы (16), можно рассчитать  $\Delta l_{p\Sigma}$ :

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 73,5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

3.2.4. Конфокальный датчик confocalDT IFS2407 имеет разрешение 3 нм в пределах диапазона измерений 0,1 мм [19]. И, так же как и ранее, используя формулу (16), получаем значение  $\Delta l_{пор\Sigma}$

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 7,35 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.5. Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS имеет разрешающую способность 30 пм (согласно IMS5600) в пределах диа-

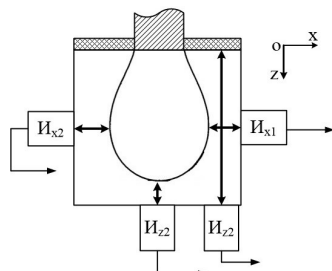


Рис. 5. Многоточечная схема измерений смещений капли

пазона измерений 2,1 мм [19]. Тогда с учетом формулы (16) можно рассчитать  $\Delta l_{p\Sigma}$ :

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 73,5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

3.2.6. У современных лазерных интерферометров разрешающая способность для контроля продольных смещений объекта записывается следующим выражением:

$$\Delta l_{\text{прог}} = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi_{\Sigma}}{4\pi} = \frac{\lambda}{2n}, \quad (17)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $\Delta\varphi_{\Sigma}$  — суммарная фазовая погрешность, основными составляющими которой в основном, согласно [20], являются шумы измерительной системы лазерного интерферометра,  $n$  — коэффициент интерполяции, определяемый фазовой погрешностью  $\Delta\varphi_{\Sigma}$ .

К настоящему времени разрешающая способность современных лазерных интерферометров для продольных перемещений уже достигла субмикрометрических значений [21, 22]. И для дальнейших расчетов можно достаточно уверенно принять  $\Delta l_{\text{прог}} = 1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$ , получая  $\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 10^{-12} \text{ м}$  и, в соответствии с формулой (17), имеем  $n = 316 \cdot 10^3$ .

3.3. Измерение смещений границы висящей капли в проходящем свете (на просвет). В данной группе представлено два устройства, осуществляющих измерение смещений висящей капли по положению ее боковых границ в трех основных ортогональных плоскостях: XOZ, YOZ и XOY.

3.3.1. Матричный видеорегистратор. В основе подобных высокоточных оптико-электронных пре-

образований контура [10–12] лежит возможность оцифровки входного изображения и для данного случая границы висящей капли путем дискретизации по пространственным координатам и квантования по уровню яркости (рис.7а, выполнен на основе рисунка из [10]). С учетом того, что размер пикселя для современных матричных видеорегистраторов достигает значений 1 мкм [23], то разрешающая способность при таком определении смещений контура висящей капли может также находиться на уровне 1 мкм. Для трехкоординатных измерений смещений висящей капли потребуется два таких матричных видеорегистратора, расположенных в плоскостях YOZ и XOZ.

3.3.2. Лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта. Принцип действия такого устройства основан на смещении поля интерференции двух дифракционных порядков лазерного луча, образованных в результате акустооптического (АО) взаимодействия, от границы объекта с последующим измерением фазового набега [24, 25]. При этом, отличаясь лишь только в оптическом тракте измерительной системы, полностью сохраняется общая структура электронного тракта. Поэтому анализ и расчеты уровня шумов для определения суммарной фазовой погрешности  $\Delta\varphi_{\Sigma}$  и, соответственно, коэффициента интерполяции  $n$ , проведенные ранее для лазерных интерферометров измерения продольных смещений и приведенные в п. 3.2.6, можно использовать и для расчета разрешающей способности лазерных интерферометров данного типа. Отличием будет только то, что вместо полупериода  $\lambda/2$  (за счет двойного хода лазерного луча) длины волны лазерного излучения в формуле (17) надо использовать длину интерференционной картины  $\Lambda_{\text{ИК}}$  или, при некотором упрощении, длину ультразвуковой волны  $\Lambda_{\text{УЗВ}}$  АО модулятора:  $\Lambda_{\text{ИК}} \approx \Lambda_{\text{УЗВ}}$ . С учетом вышесказанного, разрешающую способность для данного прибора можно определить по формуле:

$$\Delta l_{\text{поп}} = \frac{\Lambda_{\text{УЗВ}}}{n} = \frac{v_{\text{УЗВ}}}{f_{\text{аом}} \cdot n}. \quad (18)$$

Наиболее исследован вариант акустооптического способа определения поперечных смещений на основе АО модулятора со светозвукопроводом из дистиллированной воды (скорость звука

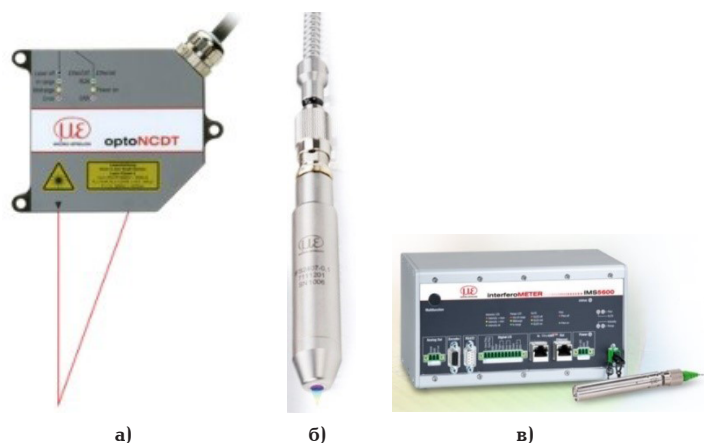


Рис. 6. Устройства для реализации многоточечной схемы измерений смещений капли [19]: триангуляционный датчик смещения optoNCDT 2300-2DR (а), конфокальный датчик confocalDT IFS2407 (б) и лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS (в)

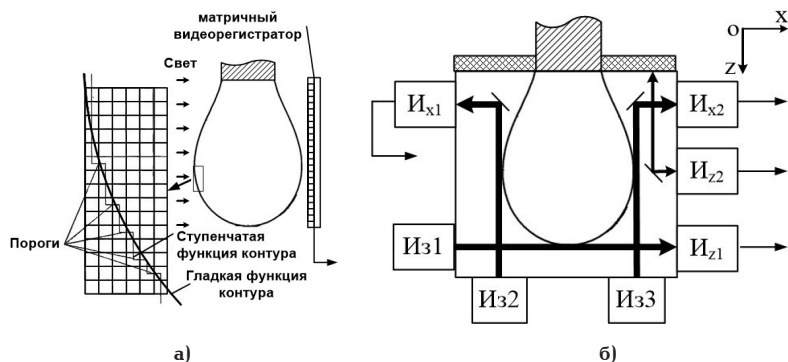


Рис. 7. Устройства измерения смещений границы висящей капли в проходящем свете (на просвет): матричный видеорегистратор (а), лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта (б)

Таблица 1

Достижимые точностные параметры и количество требуемых средств измерений трехкоординатных смещений висящей капли

№	Способ измерения	Разрешающая способность одной координаты $\Delta l_{пор}$ , м	Общее количество средств измерений, необходимое для контроля смещений висящей капли, шт	Разрешающая способность измерений трехкоординатных смещений висящей капли $\Delta l_{\rho\Sigma}$ , м
1	2D сканирующая система модели SC3500-80	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=7,8 \cdot 10^{-6}$ , $\Delta l_{\rho} z_1=10^{-6}$	2	$7,9 \cdot 10^{-6}$
2	3D сканирующая система модели LLT30x0-25	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=7,8 \cdot 10^{-6}$ , $\Delta l_{\rho} z_1=1,5 \cdot 10^{-6}$	1	$11,13 \cdot 10^{-6}$
3	Триангуляционный датчик смещения optoNCDT 2300-2DR	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=30 \cdot 10^{-9}$	6	$7,35 \cdot 10^{-9}$
4	Конфокальный датчик confocalDT IFS2407	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=3 \cdot 10^{-9}$	6	$7,35 \cdot 10^{-9}$
5	Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=30 \cdot 10^{-12}$	6	$73,5 \cdot 10^{-12}$
6	Лазерный интерферометр продольных смещений	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=10^{-12}$	6	$\approx 2,45 \cdot 10^{-12}$
7	Лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=0,57 \cdot 10^{-9}$ , $\Delta l_{\rho} z_1=0,57 \cdot 10^{-9}$ , $\Delta l_{\rho} z_2=10^{-12}$	6	$\approx 1,27 \cdot 10^{-9}$
8	Матричный видеорегистратор	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=10^{-6}$	2	$\approx 2,45 \cdot 10^{-6}$

$v_{зв} \approx 1450$  м/с), работающего на частоте  $f_{аом} = 8$  МГц. Для этих исходных данных получаем разрешающую способность при определении границы капли

$$\Delta l_{нон} = \frac{1450}{8 \cdot 10^6 \cdot 316 \cdot 10^3} \approx 0,57 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Как следует из схемы измерений, представленной на рис. 7б, для контроля смещений висящей капли вдоль осей X и Y нужно по два таких устройства, а вдоль оси Z — такое устройство в паре с интерферометром продольных смещений, описанных в п. 3.2.4. На рис. 7б обозначены: Из1–Из3 — излучатели, Их1, Их2, Из1 — измерители поперечных смещений, Из2 — измеритель продольных смещений. С учетом этого разрешающую способность для трехкоординатных измерений смещений висящей капли можно определить на основе формулы (15) (в нанометрах):

$$\Delta l_{\rho\Sigma} = \sqrt{0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,001^2} \approx 0,57\sqrt{5} = 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Вышеприведенные данные по разрешающим способностям при измерении трехкоординатных смещений висящей капли и общее количество средств измерений, необходимое для таких измерений, сведено в табл. 1.

**Заключение**

1. Построение СКОИС с осуществлением нулевого способа измерений на основе висящей капли позволяет использовать в непрерывном режиме оптические способы измерений, добиваясь максимально возможной разрешающей способности.
2. Использование магнитной жидкости в качестве основы для создания висящей капли наиболее универсально, позволяя осуществить измере-

ния НЭП, НМП и НГП с компенсацией смещений висящей капли электрическим и/или магнитным полями.

3. Современные высокоточные оптические способы измерений смещений капли могут быть реализованы на основе 2D-, 3D-сканирования, фронтальных многоточечных измерений смещений, в проходящем свете (на просвет границы капли).

4. Смещение висящей капли для воздействия опорных полей наиболее удобно осуществить электрическим полем  $E_{on}$ , приданием ей электростатического заряда  $q_{кан}$  и воздействием на нее магнитным полем  $H_{on}$  при использовании магнитной жидкости в качестве основы капли.

5. Максимальная разрешающая способность при измерении трехкоординатных смещений капли достигается при осуществлении многоточечной схемы измерений с использованием лазерных интерферометров продольных измерений смещений.

#### Библиографический список

- Zhang B., He J. Space electric field measurement system. CN patent 110488103; filed August 28th, 2019; published January 15th, 2021.
- Yue G., Du Z. High-frequency high-precision space electric field measurement system and method. CN patent 112198374; filed September 30th, 2020; published October 22th, 2021.
- Глуховера 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.
- Ахмеджанов Р. А., Чередов А. И., Щелканов А. В. Градиентометр напряженности магнитного поля // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 75–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-75-79.
- Иванов В. В. Автономный орбитальный геомагнитный навигатор // Решетневские чтения. 2011. Т. 2. С. 571–572.
- Конешов В. Н., Михайлов П. С., Соловьев В. Н., Железняк Л. К. Оценка перспективности и разрешающей способности ультравысокотемпературных моделей гравитационного поля земли // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 1. С. 40–53.
- 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.
- Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 2 // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 78–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-78-88.
- Leun E. V. The best sensitive single-coordinate interference jet-drop measurement of electric field strength // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2182. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012095.
- Козлов П. С. Метод, алгоритмы и специализированное оптико-электронное устройство для вычисления флотационной активности реагентов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.05.- Курск, 2013.- 117 с.
- Емельяненко А. М. Разработка новых физических и математических методов исследования равновесия в зоне трехфазного контакта: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 237 с.
- Gupta A., Pandey A., Kesarwani H. [et al.]. Automated determination of interfacial tension and contact angle using computer vision for oil field applications // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. DOI: 10.1007/s13202-021-01398-6.
- Белых С. С. Оптические исследования процессов ориентационного и структурного упорядочения в магнитных эмульсиях: дис. ... канд. тех. наук. Ставрополь, 2022. 159 с.
- Бушуева К. А., Костарев К. Г., Шмырова А. И. Деформация капли феррожидкости, лежащей на жидкой подложке, в однородном вертикальном магнитном поле // Конвективные течения. 2015. № 7. С. 143–157.
- Моцар А. А. Упруго-диссипативные процессы в ограниченных объемах магнитной жидкости при воздействии магнитных полей применительно к магнитожидкостным виброзащитным устройствам: дис. ... канд. тех. наук. Минск, 2017. 175 с.
- Малсугенов О. В. Капелеструйное движение магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2003. 158 с.
- Копылова О. С. Особенности движения капли магнитной жидкости в магнитном и электрическом полях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2006 137 с.
- Магнитная жидкость. Фотография поверхности. URL: <https://moscow.mrplomb.ru/magnitnaya-jidkost-ferrofluid-na-osnove-silikona-30-ml> (дата обращения: 30.01.2023).
- Каталог измерительных датчиков компании Майкро-эпсилон. URL: <https://www.micro-epsilon.com> (дата обращения: 30.01.2023).
- Леун Е. В. К вопросу достижения субмикрометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разночастотными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-110-118.
- Isleif K.-S., Heinzl G., Mehmet M., Gerberding O. Compact multifringe interferometry with subpicometer precision // Physical Review Applied. 2019. Vol. 12 (3). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.034025.
- Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with subpicometer resolution // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20. 084008. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084008.
- Занин К. А., Москатынцев И. В. Перспективы развития космических систем оптико-электронного наблюдения с учётом совершенствования полупроводниковых приёмников изображения // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2022. № 3 (57). С. 3–10.
- Заявка 98103176/28 Российская Федерация, МПК G 01 B 9/02, 11/02. Интерференционное устройство для определения положения границы объекта // Телешевский В. И., Абдикаримов Н. Н., Леун Е. В.; заявл. 17.02.98; опубл.10.12.99.
- Заявка 98108359/28 Российская Федерация, МПК G01 B 11/02. Устройство для измерения отклонений размеров деталей // Телешевский В. И., Леун Е. В., Абдикаримов Н. Н.; заявл. 17.02.98.

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

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 трехкоординатных измерений напряженностей электрического, магнитного и гравитационного полей методом висящей капли. Часть 1 // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 114–121. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-114-121.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© Е. В. Леун