

УДК 681.3:536.24.08

## Применение емкостных датчиков для изучения процессов конденсации в коротких низкотемпературных тепловых трубах. Расчет датчиков

Канд. физ.-мат. наук А. В. СЕРЯКОВ<sup>1</sup>, Ю. Е. МИХАЙЛОВ, С. Л. ШАКШИН

<sup>1</sup>seryakovav@yandex.ru

АО «НПП «СТАРТ», 173021, Великий Новгород, ул. Нехинская 55

*Приведено описание автоматизированного емкостного измерителя локальной толщины пленки конденсата рабочей жидкости в коротких низкотемпературных тепловых трубах. Представлены конструкция, расчет величины емкости открытого малогабаритного емкостного датчика для проведения измерения локальной толщины пленки рабочей жидкости на поверхности конденсации внутри тепловых труб. Показано распределение электрического поля над торцевыми поверхностями измерительных электродов открытого емкостного датчика во внешней жидкой диэлектрической среде. Проведен расчет величин емкости малогабаритного датчика для четырех значений диаметра электродов. Результаты расчета емкости датчиков при диаметрах электродов 100, 500, 1000 мкм совпадают с вычисленными значениями емкости датчика для диаметра электродов 250 мкм во всем диапазоне изменения параметра  $d/a$  при всех диаметрах измерительных электродов.*

**Ключевые слова:** низкотемпературные тепловые трубы, емкостный датчик, диэлектрическая жидкость, электрод.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 09.02.2016, принята к печати 08.07.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-3-55-61

### Ссылка для цитирования

Серяков А. В., Михайлов Ю. Е., Шакин С. Л. Применение емкостных датчиков для изучения процессов конденсации в коротких низкотемпературных тепловых трубах. Расчет датчиков // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 55–61.

## The use of the capacitive sensors for the study of condensation processes in the short heat pipes of low-temperature range. Calculation of the sensors

Ph. D. A. V. SERYAKOV, Y. E. MIKHAILOV, S. L. SHAKSHIN

JSC «SPE «START», 173021 Russia, Velikiy Novgorod, Nehinskaya st. 55

*The description of the automated capacitive meter of local thickness of working fluid condensate film in a short low-temperature range heat pipes are given. The design, the calculation of the open compact capacitive sensors' capacitance to carry out measurements of the working fluid film local thickness on the condensation surface within heat pipes are presented. Electrical field distribution above the end surfaces of the open capacitive sensor measuring electrodes in outer liquid dielectric is shown. The capacitance of compact sensor for four electrode diameters is made. The results of sensor capacitance calculation for electrode diameter of 100, 500, 1000 mcm fits the sensor capacitance data for electrode diameter of 250 mcm at all  $d/a$  parameters for all diameters of measuring electrode.*

**Keywords:** low-temperature heat pipe, capacitive sensor, dielectric fluid, electrode.

### Введение

Интенсивное развитие и практическое использование коротких низкотемпературных тепловых труб (ТТ) ставит задачи детального изучения характеристик внутреннего течения пленки конденсата рабочей жидкости внутри ТТ на поверхности конденсации.

Жидкие пленки конденсата в низкотемпературных ТТ имеют малую толщину (0,001–0,1 мм) и небольшое тепловое сопротивление, что и определяет высокую эффективность ТТ.

Формирование сложных пространственных течений влажного пара вблизи поверхности конденсации ТТ, массоперенос в пленку и наличие относительного движения

фаз при конденсации приводят к образованию возмущений, возникновению дополнительных касательных и нормальных напряжений на границе пленки и пара и нестабильности значений толщины пленки.

Кроме того, при высоких тепловых нагрузках на капиллярно-пористый испаритель течение в паровом канале коротких незамкнутых ТТ становится пульсационным [1–4], что связывают с началом кипения в испарителе и образованием большого количества пара над ним. Возникновение пульсаций скорости и давления в паровом канале коротких ТТ приводит к модулированию толщины жидкостной пленки на поверхности конденсации с частотой возникающих пульсаций, и это позволяет

применить емкостный метод для измерения частоты пульсаций и средней локальной толщины пленки конденсата рабочей жидкости. Подробности измерений частоты пульсаций в паровом канале коротких ТТ приведены в [2–3].

Опытное определение толщины, температуры, и в дальнейшем скорости течения жидкостной пленки на поверхности конденсации внутри ТТ представляет собой важную практическую задачу, решение которой до недавнего времени сдерживалось отсутствием необходимого измерительного оборудования, которое должно быть введено внутрь металлического корпуса и при этом не оказывать возмущающего влияния на работу ТТ.

Данная статья посвящена изложению результатов применения емкостного метода для исследования процессов конденсации внутри коротких низкотемпературных ТТ с металлическим корпусом и измерения усредненной во времени толщины пленки конденсата рабочей жидкости на поверхности конденсации в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель. Для измерения толщины пленки нами был применен стандартный метод регистрации изменений электрической емкости конденсатора при изменении толщины пленки конденсата рабочей жидкости на измерительной поверхности электродов датчика.

Применение емкостного метода для определения толщины слоя рабочей жидкости в трубах рассмотрено в ряде работ [5–16], наиболее точные и надежные результаты получаются при отличии диэлектрических проницаемостей жидкой и паровой (газовой) фаз в пять и более раз,  $\epsilon_l/\epsilon_{vp} \geq 5$ . В этом случае даже при малых размерах электродов емкостный датчик имеет достаточную чувствительность 10–30 пФ/м (0,01–0,03 пФ/мм), что обычно достаточно при применении измерительной аппаратуры с чувствительностью измерения электрической емкости  $10^{-4}$  пФ.

При малой разности в диэлектрической проницаемости жидкой и паровой фаз  $\epsilon_l/\epsilon_{vp} \sim 1$  чувствительность и широкополосность измерений с помощью малогабаритного емкостного датчика увеличивают за счет увеличения частоты и применения разностного метода, связанного с измерением разности частот измерительного и опорного высокочастотных генераторов, а также в управлении измерениями с помощью компьютера РС.

### Емкостный датчик. Конструкция и применение

Наиболее полная на сегодняшний день классификация различных конструкций емкостных датчиков, применяемых при изучении гидродинамики течений пленок жидкости в каналах приведена в работе [13]. Наш малогабаритный открытый емкостный датчик представляет собой дальнейшее развитие и совершенствование одного из вариантов приведенных там датчиков, на конструкцию которого получен патент [17]. Разработанный открытый датчик позволяет проводить измерения локальных характеристик пленочных течений, прежде всего толщины пленки и ее температуры, без внесения существенных возмущений в поток.

Для измерений толщины пленки жидкого конденсата были применены короткие ТТ, паровой канал в которых выполнен в виде сопла, близкого к соплу Лаваля [18–19]. Подробное описание ТТ приведено в статье [20].

Малогабаритный открытый емкостный датчик представляет собой следующее устройство, внешний вид которого приведен на рис. 1. Корпус датчика выполнен в виде круглого плоского фланца диаметром 5,5 мм и толщиной 1 мм, с двумя сквозными цилиндрическими отверстиями диаметром 1 мм каждое, расположенными на расстоянии 2 мм друг от друга симметрично относительно продольной оси фланца. В каждом сквозном отверстии выполнены вакуумно-плотные металlostеклянные спаи диаметром 1 мм по ОСТ 107.460092.002–86. В металlostеклянных спаях жестко зафиксированы два измерительных электрода диаметром 0,5 мм и длиной 10 мм каждый. Расстояние между осевыми линиями измерительных электродов  $a = 2$  мм. К внешней поверхности фланца дополнительно приварен электрод заземления также диаметром 0,5 мм и длиной 10 мм. Верхняя поверхность датчика шлифована и называется измерительной поверхностью датчика.

Фланец, измерительные и заземляющий электроды открытого емкостного датчика выполнены из ковары (kovar) 29 НК по ГОСТ 10994–74 с ЛКТР  $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , плотностью 8350 кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности 19 Вт/(м·К).

Вакуумно-плотные металlostеклянные спаи выполнены из стекла С48–2 с ЛКТР  $\sim 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , плотностью 2550 кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности 8,5 Вт/(м·К) и температурой размягчения  $\sim 843 \text{ K}$  (570 °С).

Диэлектрическая проницаемость стекла С48–2  $\epsilon_{gl} = 5,2$ , тангенс угла диэлектрических потерь при частоте электромагнитных колебаний  $10^6$  Гц не превышает  $28 \cdot 10^{-4}$ , удельное электрическое сопротивление стекла  $10^{14}$  Ом·м.

Плоская измерительная поверхность датчиков шлифована с шероховатостью не более 0,63 мкм по ГОСТ 2789–73, включая поверхность измерительных электродов и металlostеклянных спаев. Сопротивление электрической изоляции измерительных электродов более  $2 \cdot 10^{11}$  Ом, электрическое сопротивление электродов не более 0,7 Ом, рабочее напряжение до 500 В, напряжение пробоя  $\sim 1500$  В, температура применения малогабарит-

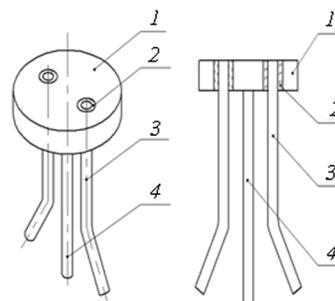


Рис. 1. Схема открытого малогабаритного емкостного датчика: 1 — фланец с измерительной поверхностью; 2 — стеклянные изоляторы; 3 — измерительные электроды с измерительными торцевыми поверхностями; 4 — заземляющий электрод

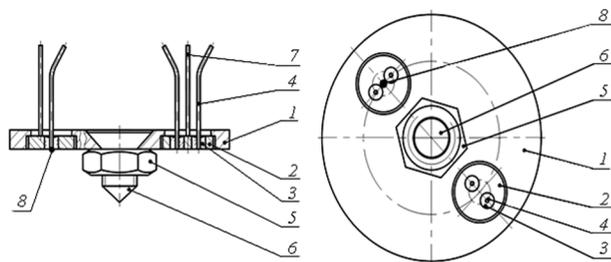


Рис. 2. Схема установки двух емкостных датчиков в верхнюю крышку ТТ

ных открытых емкостных датчиков 77÷473 К (–196÷200 °С).

Вакуумно-плотные металlostеклянные спаи емкостных датчиков конденсации характеризуются высокой механической прочностью, позволяющей выдерживать избыточное давление до 30 бар, и высоким показателем герметичности или малой величиной газовой проницаемости (газовой утечки), не превышающей  $10^{-9}$  mbar·l·s<sup>-1</sup> ( $10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>).

Показатель герметичности металlostеклянных спаев малогабаритного емкостного датчика был определен стандартным способом по измерению скорости утечки газообразного гелия с помощью образцовой вакуумной камеры и течеискателя ГТИ-6.

Следствием отсутствия в конструкции наших открытых емкостных датчиков стареющих материалов (пластических масс, клеев, органики, и т. д.) является высокая стабильность его характеристик, что подтверждается неизменностью величин сопротивления изоляции и собственной емкости первых экземпляров датчиков, изготовленных начиная с 1990 г.

Схема установки двух емкостных датчиков в верхнюю крышку ТТ (рис. 2) состоит из: 1 — верхняя крышка ТТ, выполненная из стали 1Х18Н9Т; 2 — собственно емкостные датчики, по своему периметру приваренные к крышке 1 лазерной сваркой, при этом шлифованная измерительная поверхность датчиков заподлицо совпадает с внутренней поверхностью крышки; 3 — стеклянные изоляторы (металlostеклянные спаи); 4 — измерительные электроды обоих датчиков; 5 — крепежная гайка дополнительного узла ТТ, приваренная к внутренней поверхности крышки 1; 6 — запорный винт дополнительного узла ТТ; 7 — электрод заземления емкостного датчика; 8 — микротермистор, представляющий собой чувствительный элемент термистора СТЗ–19 и приваренный лазерной сваркой к ориентированным в тангенциальном направлении торцевым поверхностям электродов одного из емкостных датчиков. Диаметр микротермистора 0,2 мм, он электрически изолирован от крышки ТТ. Здесь же показана поверхность конденсации верхней крышки 1 и установленные в радиальном направлении торцевые поверхности измерительных электродов емкостного датчика.

**Емкостный датчик. Аналитическая оценка**

Конструкция открытых датчиков, расстояние между электродами, диаметр электродов и стеклянных изо-

ляторов, размер и ориентация окружающего металлического фланца определяют пространственное и временное разрешение емкостного датчика, его чувствительность и широкополосность частотной характеристики.

Простой анализ расчетных значений взаимной электрической емкости двух измерительных электродов открытого датчика на воздухе [5–6] показывает, что основной вклад в величину собственной емкости вносит взаимодействие измерительных электродов с окружающим их металлическим фланцем, которое может быть записано следующим образом:

$$C_0 \cong \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{gl} L_{gl}}{\ln\left(\frac{l}{d} + \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1}\right)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{air} L_{air}}{\ln\left(\frac{l}{d} + \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1}\right)} + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{air}d}{\pi} \ln\left[\left(1 + \frac{d}{a}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{d}{a}\right)^2 - 1}\right] + C_{int}. \quad (1)$$

В формуле (1) первый член обозначает вклад в собственную электрическую емкость датчика взаимодействующих между собой участков (частей) измерительных электродов, находящихся внутри металlostеклянных спаев, второй член обозначает вклад взаимодействующих между собой участков измерительных электродов, находящихся на воздухе, третий член обозначает электрическую емкость лежащих в одной плоскости и взаимодействующих между собой торцевых поверхностей измерительных электродов, а четвертый член  $C_{int}$  обозначает вклад взаимодействия двух измерительных электродов с металлическим фланцем датчика и электродом заземления. Суммарная величина емкости первых трех членов выражения (1) составляет ~ 0,557 пФ.

Приближенная оценка вклада в емкость открытого датчика взаимодействующих с металлическим фланцем и электродом заземления двух измерительных электродов  $C_{int}$  может быть проведена с помощью приведенного в [5] выражения для оценки взаимной емкости прямолинейного изолированного провода конечной длины, и расположенной перпендикулярно проводу проводящей пластины. В проводящей пластине есть сквозное отверстие радиуса  $r$ , и провод проходит сквозь это отверстие и электрически взаимодействует не только с пластиной, но и с электродом заземления, соединенным с пластиной. Взаимную емкость, получающуюся в результате взаимодействия, можно записать в следующем виде:

$$C_{int} \cong \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_{gl} L_{gl}}{\ln\left[\frac{4rL_{gl}}{d(2r + L_{gl})}\right]} + \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_{air} L_{air}}{\ln\left[\frac{4rL_{gl}}{d(2r + L_{gl})}\right]} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{air} L_{air}}{\ln\left(\frac{l}{d} + \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1}\right)} + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{air}d}{\pi} \cdot \frac{\ln\left[\left(1 + \frac{d}{a}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{d}{a}\right)^2 - 1}\right]}{\ln\left[\frac{4rL_{gl}}{d(2r + L_{gl})}\right]}. \quad (2)$$

Первый член выражения (2) обозначает вклад в емкость взаимодействующих с проводящей пластиной участков двух измерительных электродов, покрытых

стеклянной изоляцией, второй член обозначает вклад в емкость взаимодействующих с пластиной и находящихся на воздухе участков двух измерительных электродов, третий член обозначает вклад в емкость взаимодействующих с электродом заземления двух измерительных электродов, четвертый член обозначает вклад в емкость взаимодействующих с пластиной и параллельных ей открытых торцевых поверхностей измерительных электродов.

Проведенные вычисления по формуле (2) дают значение  $C_{int} \sim 0,967$  пФ, что вместе с результатами расчетов по формуле (1) в сумме приводят к величине  $C_0 \sim 1,524$  пФ при опытном значении емкости сухого датчика на воздухе  $C_{0exp} = 1,55 \pm 0,01$  пФ. Погрешность расчета емкости датчика по формулам (1) и (2) согласно [5–6] не менее 10%, и полученный результат в пределах этой погрешности совпадает с экспериментально определенным значением емкости.

При применении открытого емкостного датчика в качестве устройства для определения толщины слоя находящейся на его измерительной поверхности диэлектрической жидкости, прежде всего изменяется взаимная емкость торцевых поверхностей измерительных электродов, соприкасающихся с исследуемой жидкостью, поэтому дальнейшие аналитические оценки могут быть проведены только для емкости торцевых поверхностей измерительных электродов.

При этом для простоты анализа вкладом в емкость  $C_0$  от взаимодействия плоских торцевых поверхностей измерительных электродов и ориентированного параллельно им металлического фланца, оцениваемым четвертым членом в формуле (2) и не превышающим величину 0,15 пФ в первом приближении можно пренебречь. Величину изменяющейся емкости торцевых поверхностей измерительных электродов  $C_{surf}$  можно записать в виде, приведенном в [5]:

$$C_{surf} = \frac{Q}{2U} = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{liq}d}{\pi} \ln \left[ \left( 1 + \frac{d}{a} \right) + \sqrt{\left( 1 + \frac{d}{a} \right)^2 - 1} \right]. \quad (3)$$

Для оценки величины дальнего действия открытого малогабаритного емкостного датчика достаточно провести анализ распределения электрического поля из формулы (3) вне измерительных электродов в плоской двухмерной постановке задачи.

Двухмерное распределение электрического поля во внешней диэлектрической среде вне торцевых поверхностей измерительных электродов диаметром  $d$ , и разнесенных между собой на расстояние  $a$ , изображенное на рис. 4, и проведенное в плоскости продольных осей электродов, определяет глубину  $\Lambda$  распространения электрического поля (величину дальнего действия) датчика в направлении продольной оси  $z$  в исследуемом слое (пленке) рабочей жидкости с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{liq}$  и толщиной  $h_{liq}$ .

Для вычисления электрических полей в плоской двумерной постановке задачи существует математический метод конформного отображения, основанный на теории функций комплексного переменного [21–23]. В лекциях Фейнмана [21] приведены примеры применения метода конформных отображений с обратным преоб-

зованием для расчета плоских электрических полей в конкретных задачах.

Емкостные датчики с открытыми электродами (открытые датчики) создают в окружающем пространстве неоднородное электрическое поле, напряженность которого монотонно убывает с увеличением расстояния от излучающей торцевой поверхности измерительных электродов.

Глубина проникновения  $\Lambda$  двухмерного электрического поля в направлении оси  $z$  между электродами открытого емкостного датчика может быть определена через размер эллиптического контура, соответствующего напряженности электрического поля на расстоянии  $a = \sqrt{x^2 + z^2}$  от торцевых поверхностей измерительных электродов как показано на рис. 3.

Форма эллипса, приблизительно описывающего электрические силовые линии над торцевыми поверхностями измерительных электродов, определяется по уравнению эллипса (4) с коэффициентами в виде гиперболических функций, зависящими от величины потенциала на электродах датчика и потока напряженности электрического поля во внешней среде [23]:

$$\frac{x^2}{\cosh^2\left(\frac{\pi \int Edl}{2U}\right)} + \frac{z^2}{\sinh^2\left(\frac{\pi \int Edl}{2U}\right)} = a^2. \quad (4)$$

Глубина проникновения  $\Lambda$ , соответствующая максимальной длине распространения вертикальной компоненты электрического поля вдоль оси  $z$  над торцевыми поверхностями измерительных электродов может быть оценена по формуле:

$$\Lambda = a \sinh \left[ \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{d}{a} \right) \right] = a \sqrt{\left( 1 + \frac{d}{a} \right)^2 + 1}. \quad (5)$$

Для слоев диэлектрической жидкости, толщина которых больше глубины проникновения электрического поля,  $h_{liq} > \Lambda$ , рис. 3. (а), функциональная зависимость

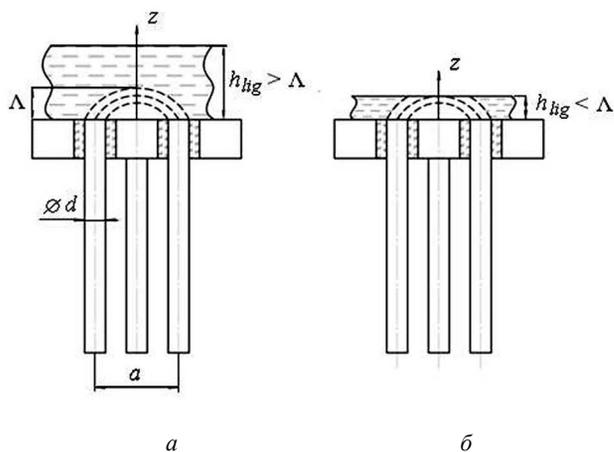


Рис.3. Распределение электрического поля над торцевыми поверхностями измерительных электродов открытого емкостного датчика во внешней жидкой диэлектрической среде:  
а — толщина слоя жидкости больше глубины проникновения  $h_{liq} > \Lambda$ ;  
б — толщина слоя жидкости меньше глубины проникновения электрического поля  $h_{liq} < \Lambda$

роста емкости датчика при увеличении толщины слоя жидкости существенно ослабевает и приближается к насыщению, что подтверждается результатами калибровок, приведенными ниже.

Для тонких слоев диэлектрической жидкости (жидкостных пленок), толщина которых меньше глубины проникновения поля  $h_{liq} < \Lambda$ , рис. 3. (б) и при условии, когда диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости больше (много больше) диэлектрической проницаемости пара или газа  $\epsilon_{liq} > \epsilon_{vp}$ , можно считать, что электрическое поле распространяется только в пленке жидкости и отсутствует вне ее, и фактическая глубина проникновения поля  $\Lambda$  равна толщине пленки жидкости. В этом случае на основании выражения (5) можно записать следующее уравнение, связывающее толщину пленки рабочей жидкости, диаметр и расстояние между электродами датчика:

$$h_{liq} = a \sqrt{\left(1 + \frac{d}{a}\right)^2 - 1}. \quad (6)$$

Решаем квадратное уравнение (6) и получаем из него единственный положительный корень, с помощью которого может быть вычислено минимально необходимое значение диаметра измерительных электродов при малых толщинах измеряемой пленки рабочей жидкости:

$$d = a \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{h_{liq}}{a}\right)^2} - 1 \right]. \quad (7)$$

В предельном случае очень малых толщин  $h_{liq} \ll \Lambda$  ( $h_{liq} \ll a$ ), выражение (7) может быть упрощено, и в результате получаем величину минимального диаметра электродов емкостного датчика:

$$d_{min} = a \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{h_{liq}}{a}\right)^2} - 1 \right] \cong \frac{1}{2} \frac{(h_{liq})^2}{a}. \quad (8)$$

При толщине пленки жидкости порядка 0,1 мм минимальный диаметр электродов должен быть порядка 0,0025 мм.

Расстояние  $a$  между измерительными электродами емкостного датчика, предназначенного для изучения процессов конденсации и течения жидкого конденсата в низкотемпературных ТТ, должно быть меньшим капиллярной постоянной рабочей жидкости, используемой в ТТ. Капиллярная постоянная определяет характерный размер капиллярных волн, которые могут возникнуть при течении пленки конденсата рабочей жидкости внутри ТТ, и величина капиллярной постоянной может быть оценена по формуле [24]:

$$k = \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_{vp})}}. \quad (9)$$

Для выбранного в качестве рабочей жидкости диэлектрического эфира  $C_4H_{10}O$ , имеющего температуру кипения при атмосферном давлении  $T_b = 308,55$  К (35,4 °С), капиллярная постоянная при комнатной температуре 293 К равна 2,23 мм, поэтому расстояние между электродами малогабаритного емкостного датчика не должно превышать величину  $a = 2$  мм.

## Емкостный датчик. Численный расчет

Простота конструкции малогабаритного емкостного датчика дает возможность провести подробный численный расчет его собственной емкости с помощью программы, реализующей т.н. метод компьютерной томографии [25–29]. Эта программа позволяет восстановить (реконструировать) распределение электрических зарядов в системах взаимодействующих распределенных электродов неканонической формы с изоляторами, в т.ч. окруженными перпендикулярно ориентированным металлическим фланцем, см. рис. 1. В электростатическом поле близко расположенных измерительных электродов и металлического фланца с электродом заземления потенциал измерительного электрода в любой его точке одинаков, однако электрический заряд из-за влияния внешней поляризации распределен по поверхности электрода неравномерно. Поэтому основной задачей при вычислении емкости малогабаритного датчика является определение распределения полной плотности электрических зарядов по поверхности электродов и фланца датчика с учетом их геометрических размеров, формы, взаимного расположения и ориентации.

Метод компьютерной томографии позволяет решить задачу с помощью хорошо разработанных компьютерных программ для расчета обратных интегральных преобразований [27–29]. Расчет емкости малогабаритного емкостного датчика был проведен при четырех значениях диаметров измерительных электродов  $d = 100, 250, 500, 1000$  мкм. Диаметр и толщина фланца, а также внешний диаметр металлостеклянных спаев оставались неизменными. Шаг изменения параметра  $d/a$  при расчете емкости датчиков с диаметрами электродов  $d = 100, 500, 1000$  мкм составляет единицу в каждом десятичном диапазоне логарифмической шкалы (рис. 4), при расчете емкости датчика с диаметром измерительных электродов  $d = 250$  мкм шаг изменения параметра  $d/a$  был уменьшен в 10 раз в каждом десятичном диапазоне шкалы.

Результаты расчета емкости датчика с диаметром электродов  $d = 250$  мкм представлены в виде сплошной кривой на рис. 4. На эту кривую нанесены расчетные значения емкости датчика при трех различных значениях диаметра электродов  $d = 100, 500, 1000$  мкм. Все расчеты были проведены в диапазоне изменения параметра  $2 \cdot 10^{-4} \leq d/a \leq 1$ . Абсолютная погрешность расчета емкости малогабаритного датчика с помощью программы, реализующей метод компьютерной томографии не превышает  $10^{-2}$  пФ.

Расчетная емкость сухого малогабаритного датчика при величине параметра  $d/a = 0,25$  при  $d = 0,5$  мм и  $a = 2$  мм составляет  $C_0 = 1,55$  пФ, что точно совпадает с экспериментально определенным значением емкости сухого датчика  $C_{0exp} = 1,55 \pm 0,01$  пФ.

Хорошо видно, что результаты расчета емкости датчиков при диаметрах электродов  $d = 100, 500, 1000$  мкм совпадают с вычисленными значениями емкости датчика для диаметра электродов  $d = 250$  мкм во всем диапазоне изменения параметра  $d/a$  при всех диаметрах измерительных электродов.

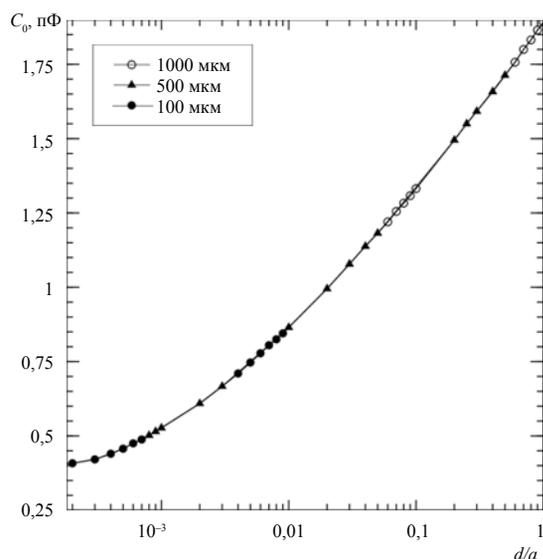


Рис. 4. Расчетные величины емкости малогабаритного датчика для четырех значений диаметра электродов

#### Условные обозначения:

$a$  — расстояние между измеряющими электродами открытого емкостного датчика, м;

$C_{surf}$  — емкость между торцевыми поверхностями измерительных электродов, пФ;

$d$  — диаметр измерительных электродов малогабаритного емкостного датчика, м;

$E$  — электрическое поле над торцевыми поверхностями измерительных электродов открытого емкостного датчика, В/м;

$[Edl]$  — поток вектора напряженности электрического поля по контуру длиной  $l$ , В;

$g$  — ускорение силы тяжести земного притяжения,  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$h_{liq}$  — толщина пленки жидкости над поверхностью датчика, м;

$L_{gl}$  — длина электродов емкостного датчика, находящихся внутри стеклянного спая, м;

$L_{air}$  — длина электродов емкостного датчика, находящихся на воздухе, м;

$l$  — длина контура интегрирования распространившегося электрического поля, м;

$Q$  — электрический заряд на электродах емкостного датчика, Кл;

$r$  — радиус отверстия в пластине, м;

$U$  — разность потенциалов между электродами емкостного датчика, В;

$x$  — координата, лежащая в плоскости измерительной поверхности открытого емкостного датчика, и пересекающая продольные оси измерительных электродов датчика, м;

$z$  — координата, перпендикулярная к поверхности пластины плоского конденсатора и пленке текущей жидкости, а также к измерительной поверхности открытого емкостного датчика, м;

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная, равная  $8,84642 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;

$\epsilon_{air}$  — диэлектрическая проницаемость воздуха, безразмерная величина;

$\epsilon_{gl}$  — диэлектрическая проницаемость стекла С48–2, безразмерная величина;

$k$  — капиллярная постоянная рабочей жидкости, м;

$\Lambda$  — глубина проникновения (распространения) электрического поля над измерительными электродами открытого емкостного датчика, м;

$\rho_L$  — плотность рабочей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_{vp}$  — плотность пара рабочей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения рабочей жидкости, Н/м.

#### Литература (References)

- Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes. *International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application*. 2014, v. 2, N 2, pp. 40–49.
- Seryakov A. V., Ananiev V. I., Orlov A. V. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes. Proceedings of the IX Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources. Minsk, Belarus, 7–10 September 2015, v. 2. p. 168–176.
- Seryakov A. V., Ananiev V. I. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes. Proceedings of the VIII International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, September 15–18 2015. Begell House Inc. p. 693–696.
- Seryakov A. V., Konkin A. V. Numerical simulation of pulsations in vapour channel of low-temperature range heat pipes. Proceedings of the VIII International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, September 15–18, 2015. Begell House Inc. pp. 677–680.
- Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. 2-е изд., перераб. и допол. — Л.: Энергоиздат. 1981. 288 с. [Iosel Y. Ya., Kochanov E. S., Strunskiy M. G. Calculation of electric capacity. Leningrad. Energoizdat. 1981. 288 p. (in Russian)]
- Форе́йт И. Емкостные датчики неэлектрических величин. — М.: Энергия. 1966, 160 с. [Foreit I. Capacitor sensors of not electrical quantities. Moscow. Energiya. 1966, 160 p. (in Russian)]
- Роговая А., Олевский В. М., Ринова Н. С. Измерение толщины и профилей жидкостной пленки // Приборы и техника эксперимента. 1968. № 1, с. 189–192. [Rogovaya A., Olevskiy V. M., Rinova N. S. Measurement of thickness and profiles of a liquid film. *Priboru i texnika experimenta*. 1968. No 1, pp. 189–192. (in Russian)]
- Ozgu M. R., Chen J. C., Eberhardt N. A capacitance method for measurement of film thickness in two-phase flow. *Review of Scientific Instruments*. 1973. v. 44. pp. 1714–1716.
- Klausner J. F., Zeng L. Z., Bernhard D. M. Development of a film thickness probe using capacitance for asymmetrical two-phase flow with heat addition. *Review of Scientific Instruments*. 1992. v. 63. pp. 3147–3152.
- Кротов С. В., Назаров А. Д. и др. Емкостный измеритель локальной толщины пленки жидкости. // Приборы и техника эксперимента. 1997. № 1, с. 149–152. [Krotov S. V., Nazarov A. D. ets. Capacitor measuring instrument of local

- thickness of a film of liquid. *Priboru i tekhnika experimenta* 1997. No 1, p. 149–152. (in Russian)]
11. Алексеев С. В., Назаров А. Д. и др. Течение пленки криогенной жидкости по вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 1997. т. 4, № 3. с. 307–317. [Alekseenko S. V., Nazarov A. D. et al. Current of a film of cryogenic liquid on a vertical surface. *Thermophysics and Aeromechanics*. 1997. v. 4, No 3, p. 307–317. (in Russian)]
  12. Павленко А. Н., Лель В. В., Серов А. Ф., Назаров А. Д. Динамика течения интенсивно испаряющейся волновой пленки жидкости // Прикладная механика техническая физика. 2001. т. 42. № 3, с. 107–115. [Pavlenko A. N., Lel V. V., Serov A. F., Nazarov A. D. Dynamics of a current of intensively evaporating wave film of liquid. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya physika*. 2001. v. 42. No 3, p. 107–115. (in Russian)]
  13. Алексеев С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волновое течение пленок жидкости. — Новосибирск: Наука, 1992. 256 с. [Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G. Wave current of films of liquid. Nauka, 1992. p. 256. (in Russian)]
  14. Thorncroft G. E., Klausner J. F. A Capacitance sensor for two-phase liquid film thickness measurements in a square duct. *Journal of Fluids Engineering*. 1997. v. 119. No 1. p. 164–169.
  15. Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation. The Royal Society of Chemistry. Lab Chip 2004. v. 4. p. 473–480.
  16. Tibirićá C. B., Nascimento F. J., Ribatski G. Film thickness measurement techniques applied to micro-scale two-phase flow systems. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010 v. 34. p. 463–473.
  17. Патент на полезную модель №152108 / Сeryakov А. В. Емкостный датчик определения толщины слоя жидкости. Опубликовано 27.06.2015. Бюллетень № 18/2015. [Patent for useful model №152108 / Seryakov A. V. Capacitor sensor of determination of thickness of a layer of liquid. Opublikovano 27.06.2015. Bulletin № 18/2015. (in Russian)]
  18. Сeryakov А. В., Конкин А. В., Белоусов В. К. Применение струйного парового сопла в тепловых трубах среднетемпературного диапазона // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2012. Выпуск 1 (41), с. 142–147. [Seryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K. Primenenie struinogo parovogo sopla v teplovykh trubakh srednetemperaturnogo diapazona. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2012. No 1 (41), p.142–147. (in Russian)]
  19. Seryakov A. V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013, v.2, No 8, p. 1595–1603.
  20. Сeryakov А. В. Исследование коротких низкотемпературных тепловых труб. Часть 1. Экспериментальные и численные исследования. // Вестник Международной академии холода. 2014. № 4. [Seryakov A. V. Research of short low-temperature thermal pipes. Part 1. Pilot and numerical studies. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No 4. (in Russian)]
  21. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. Электричество и магнетизм. — М.: Мир. 1966. 296 с. [Feinman R., Leiton R., Sends M. Feynman lectures on physics. V. 5. Electricity and magnetism. — М.: Mir. 1966. 296 p. (in Russian)]
  22. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. 621с. [Landau L. D., Lifshits E. M. Theoretical physics. Volume 8. Electrodynamics of continuous environments. Moscow. Nauka, 1982. 621 p. (in Russian)]
  23. Лаврик В. И., Савельев В. Н. Справочник по конформным отображениям. — Киев: Наукова думка 1970. 252 с. [Lavrik V. I., Savel'ev V. N. Reference book on conformal displays. Kiev: Naukova dumka 1970. 252 p. (in Russian)]
  24. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика в 10 томах. Т. 6. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. 736 с. [Landau L. D., Lifshits E. M. Theoretical physics in 10 volumes. V. 6. Hydrodynamics. Moscow. Nauka, 1986. 736 p. (in Russian)]
  25. Исаев Ю. Н., Шпильная О. П., Кулешова Е. О. Томографический метод расчета распределения заряда и емкостей плоских электродов неканонической формы // Известия Томского политехнического университета. 2005. № 7, Т. 308. с. 91–95. [Isaev Yu. N., Shpil'naya O. P., Kuleshova E. O. Tomographic method of calculation of distribution of a charge and capacities of flat electrodes of an uncanonical form. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2005. No 7, V. 308. p. 91–95. (in Russian)]
  26. Воскобойников Ю. Е. и др. Регуляризирующий алгоритм идентификации параметров схемы замещения электрического заряда. Ч.1 // Известия Томского политехнического университета. 2007. № 1, т. 310. с. 79–82. [Voskoboinikov Yu. E. i dr. Regulariziruyushchy algorithm of identification of parameters of an equivalent circuit of electric charge. P.1. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007. No 1, V. 310. p. 79–82. (in Russian)]
  27. Воскобойников Ю. Е. и др. Регуляризирующий алгоритм идентификации параметров схемы замещения электрического заряда. Ч. 2 // Известия Томского политехнического университета. 2007. № 2, т. 310. с. 73–77. [Voskoboinikov Yu. E. i dr. Regulariziruyushchy algorithm of identification of parameters of an equivalent circuit of electric charge. P. 2. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007. No 2, V. 310. p. 73–77. (in Russian)]
  28. Jackson J. D. Charge density on thin straight wire, revisited. *American Journal of Physics*. 2000. v. 68. N 9. p. 789–799.
  29. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Тимонов А. А. Математические методы компьютерной томографии. — М.: Наука, 1985. 160 с. [Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. Timonov A. A. Mathematical methods of a computer tomography. Moscow. Nauka, 1985. 160 p. (in Russian)]