

УДК 681.3:536.24.08

Применение емкостных датчиков для изучения процессов конденсации в коротких низкотемпературных тепловых трубах. Калибровка и измерения*

Канд. физ.-мат. наук А. В. СЕРЯКОВ¹, Ю. Е. МИХАЙЛОВ, С. Л. ШАКШИН

¹seryakovav@yandex.ru

АО «НПП «СТАРТ»

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, результаты калибровки, а также электронная аппаратура, позволяющие проводить измерения локальной толщины пленки рабочей жидкости на поверхности конденсации внутри тепловых труб (ТТ). С целью повышения точности калибровка датчиков и емкостного измерителя целиком были проведены во фрагменте ТТ, в котором распределение металла и электрических полей вокруг измерительных электродов тождественны условиям проведения измерений в работающей штатной ТТ. Для измерений толщины пленки конденсата рабочей жидкости внутри ТТ был применен метод регистрации изменений электрической емкости ΔC емкостного датчика при изменении толщины пленки конденсата рабочей жидкости на его поверхности. Из-за малых величин изменений емкости датчика при пленочной конденсации пара внутри ТТ, определение толщины образовавшейся пленки конденсата проводили путем измерения изменения частоты измерительного генератора с включенным в колебательный контур емкостным датчиком относительно такого же опорного генератора, в колебательный контур которого включен аналогичный емкостный датчик опорной ТТ. Применяли две идентичных ТТ, измерительную и опорную с одинаковыми емкостными датчиками, основная из которых, измерительная заполнена диэтиловым эфиром, а опорная заполнена осушенным воздухом с температурой точки росы ниже 233,15 К (-40 °С). Электронная аппаратура емкостного измерителя состоит из двух высокочастотных генераторов 33 МГц, размещенных непосредственно на верхних крышках обеих ТТ, смесителя и фильтра низких частот. Выводы емкостных датчиков впаяны в платы генераторов, окруженных экранирующими герметичными экранами и помещенных в проточном калориметре при стабилизированной температуре $T = 298 \pm 0,03$ К. Измерены усредненные во времени значения толщины пленки конденсата рабочей жидкости в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель ТТ. Погрешность измерений не превышает 2·10⁻³ мм. Показано, что толщина пленки конденсата резко уменьшается с увеличением тепловой нагрузки на испаритель короткой низкотемпературной ТТ.

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

Информация о статье:

Поступила в редакцию 05.05.2017, принята к печати 15.05.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-57-65

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Серяков А. В., Михайлов Ю. Е., Шакшин С. Л. Применение емкостных датчиков для изучения процессов конденсации в коротких низкотемпературных тепловых трубах. Калибровка и измерения // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 57–65.

The use of the capacitive sensors for the study of condensation processes in the short low-temperature range heat pipes. Calibration and measurement

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

JSC «SPE «START»

The description of the automated capacitive meter of local thickness of the of condensate film of working fluid in a short low-temperature range heat pipes are presented. Presents design, calculation of the capacitance of the open compact capacitive sensors, the calibration results, as well as electronic equipment, allowing us to carry out measurements of local thickness of the working fluid film on the condensation surface within heat pipes (HPs). With the aim of improving the accuracy of calibration the sensors and capacitance meter were generally carried out in a fragment of HPs, in which the distribution

* Продолжение статьи, опубликованной в Вестнике МАХ, 2016, №3, с. 55–61

of metal and electrical fields around the measuring electrodes of the sensors are identical to the measurement conditions that employed in the regular HPs. To measure the thickness of the liquid film condensate inside the HP was applied the method of registration of changes in the electrical capacitance ΔC of the capacitive sensor when changing the thickness of the liquid film condensate on its surface. Due to the very small changes in capacitance of the sensor with film condensation of vapour inside the HP, the determination of the thickness of the formed liquid film was carried out by measuring the change in the frequency of high frequency generator, in an oscillating circuit of which includes a measuring capacitive sensor, relative to the same reference generator, the resonant circuit of which includes similar reference capacitive sensor in the reference HP. We used two identical HPs, measurement and reference with the same capacitive sensors in each of them, the measuring one was filled with diethyl ether, and the reference one was filled with dry air with a dew point temperature below 233.15 K (-40°C). Electronics capacitance meter consists of two high-frequency generators 33 MHz placed directly on the upper lids of both HPs, mixer and low pass filter. The lead wires of the capacitive sensors are soldered in generators mounting boards, surrounded by the metal shielding screens, sealed and placed in a flow calorimeter at a stable temperature of $T = 298 \pm 0.03$ K. The measured average time values of the condensate film thickness is depending on the heat load on the capillary-porous evaporator. The measurement error does not exceed 2-10-3mm. It was shown that the condensate film thickness of the working fluid decreases sharply with increase of heat load on the evaporator in the short low-temperature range HPs.

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

Article info:

Received 05/05/2017, accepted 15/05/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-57-65

Article in Russian

For citation:

Seryakov A. V., Mikhailov Y. E., Shakshin S. L. The use of the capacitive sensors for the study of condensation processes in the short low-temperature range heat pipes. Calibration and measurement. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 2. p. 57–65

Емкостный датчик. Калибровка

Для повышения точности измерений толщины пленки жидкости на поверхности конденсации внутри тепловых труб (ТТ) при калибровке датчика необходимо тождественно воспроизвести распределение наведенных электрических полей вокруг измерительных электродов емкостного датчика, установленного заподлицо с внутренней поверхностью верхней крышки ТТ, см. рис. 1 в работе [1].

С этой целью после изготовления датчик устанавливают во фрагмент штатной ТТ и проводят калибровку датчика. Калибровка состоит в экспериментальном определении емкости датчика при независимом измерении толщины слоя калибровочной жидкости над его измерительной поверхностью при постоянной и одинаковой температуре жидкости и датчика.

Калибровка была проведена во фрагменте штатной ТТ с идентичными корпусом и верхней крышкой с установленными в ней двумя емкостными датчиками, один из которых оснащен микротермистором. При этом фрагмент ТТ представляет собой вертикально ориентированную перевернутую полость с верхней крышкой и установленными в ней датчиками. Схема фрагмента ТТ с перевернутой верхней крышкой приведена на рис. 1, способ заделки емкостных датчиков заподлицо с внутренней поверхностью верхней крышки подробно показан на рис. 3 в работе [1].

Фрагмент ТТ с укороченным корпусом (обечайкой) 3 герметично вставлен в нижнее отверстие опорной плиты 4 (см. рис. 1). Снаружи короткий фрагмент ТТ окружен термостабилизирующим кожухом 5 с проточной водой,

температура и расход которой поддерживаются постоянными с помощью внешнего термостата. Температура воды равна $T = (298 \pm 0,03)$ К. В верхней части опорной плиты 4 вырезано дополнительное верхнее отверстие, глубиной до среза корпуса ТТ и смещенное относительно продольной оси ТТ на некоторое расстояние. В это верхнее отверстие плиты 4 герметично установлен мягкий сильфон 6 из латуни Л80 по ГОСТ 21482–76.

В верхней части сильфона 6 также герметично установлен сальниковый узел 7, в центральном канале которого размещен подвижный измерительный стеклянный капилляр 8, внешний диаметр которого 1 мм, а внутренний диаметр 0,4 мм. Герметизация соединения сильфона 6 произведена с помощью чистого олова ОВЧ 000 по ГОСТ 860–75. Величина смещения верхнего отверстия относительно продольной оси ТТ выбрана таким образом, чтобы капилляр 8 при смещении вверх и вниз не касался внутренней поверхности стенки корпуса 3 ТТ.

Латунный сальниковый узел 7 выполнен в виде стандартного тефлонового уплотнения со сквозным центральным каналом диаметром 1,05 мм, в который вставлен стеклянный капилляр 8, и с верхней гайкой, регулирующей степень сжатия тефлонового уплотнения. Это позволяет проводить продольное перемещение капилляра 8 без нарушения герметичности внутреннего пространства сильфона 6 и фрагмента 3 ТТ. Кроме того, сам сильфон 6 может быть сжат или растянут в продольном направлении, при этом с помощью охранного кольца 9, внутренней поверхности которого покрыта слоем тефлона, сохраняется вертикальная ориентация как сильфона 6, так и всего сальникового узла 7. Постоянное положение в пространстве охранному кольцу 9 придает горизон-

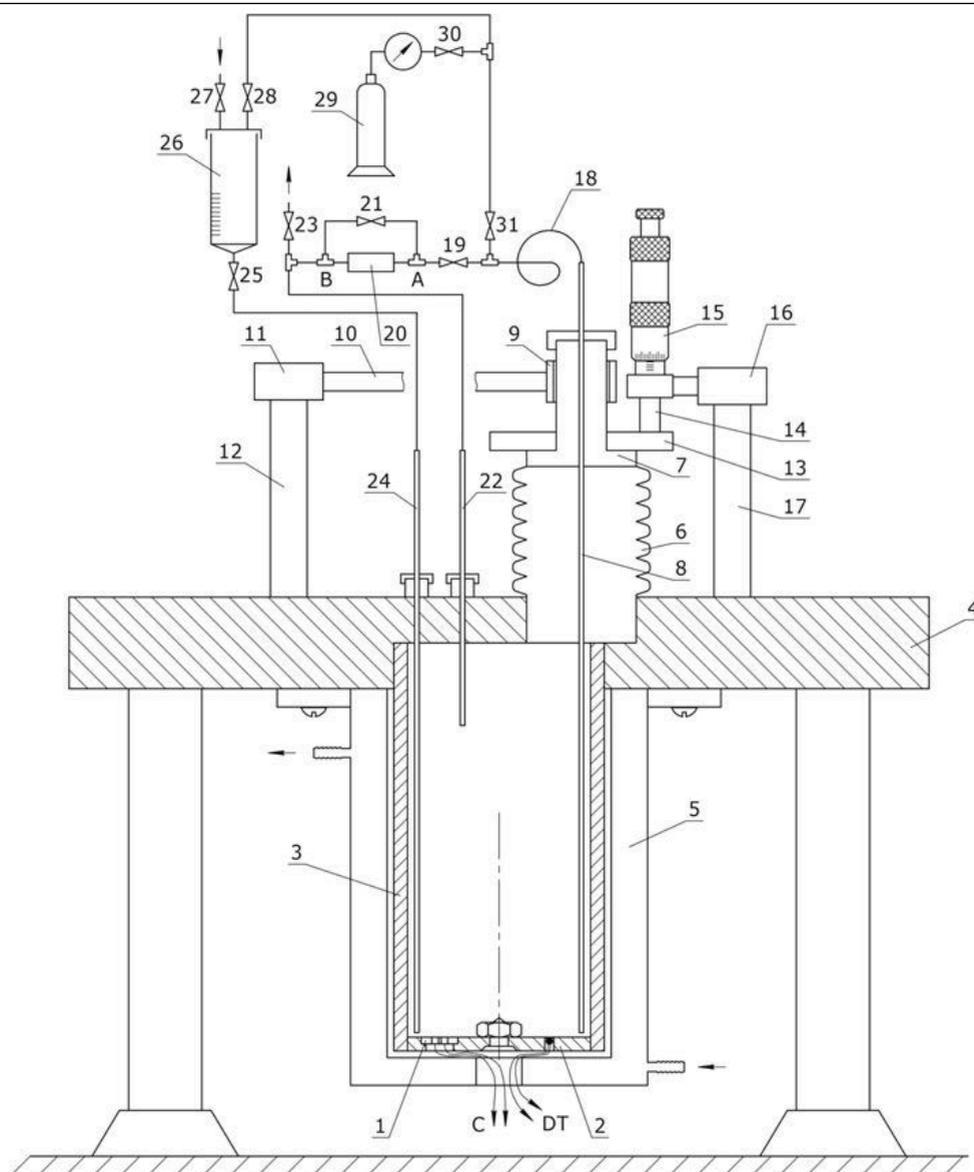


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для калибровки емкостного датчика с установленным фрагментом ТТ

тальная штанга 10, жестко зафиксированная в узле крепления 11, которое с помощью вертикальной штанги 12 опирается на опорную плиту 4.

На опорной платформе сальникового узла 7 на внутренней резьбе жестко установлена закаленная до твердости HRC 45 шайба 13, в шлифованную верхнюю поверхность которой упирается выдвигной измерительный стержень 14 микрометрического винта микроскопа МГ. Шаг микрометрического винта микроскопа МГ равен 0,002 мм в интервале подъема капилляра 0–2,5 мм. Микроскоп МГ жестко зафиксирован в узле крепления 16 с помощью вертикальной штанги 17, опирающейся на опорную плиту 4.

Измерительный стеклянный капилляр 8 в верхней своей части продолжается тонким гибким шлангом 18, который через вентиль 19 соединен с мембранным электроконтактным датчиком давления 20, вход А которого и выход В зашунтированы байпасным вентиляем 21. Мембрана датчика изготовлена из стальной фольги 1X18Н10Т толщиной 0,04 мм, диаметр мембраны 100 мм, чувствительность датчика по избыточному давлению 0,5 Па.

В газовую полость ТТ введен газовый капилляр 22, верхняя часть которого подсоединена к выходу В мембранного датчика давления 20 и через вентиль 23 сообщается с атмосферой.

Заполнительный капилляр 24, касающийся дна (крышки) ТТ, в своей верхней части через подводящую линию соединен с вентилем 25 и через него с заполнительным сосудом 26, в качестве которого может быть применен стандартный медицинский шприц с тонкой иглой.

Измерительный стеклянный капилляр 8 размещен в противоположной от калибруемого емкостного датчика стороне фрагмента ТТ рядом с микротермистором и термодарой, заполнительный капилляр 24 размещен рядом с измерительным капилляром, и только из-за двумерного характера изображения на рис. 1 показано иначе.

В качестве рабочих жидкостей при калибровке были применены диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$ квалификации ОСЧ, этиловый спирт C_2H_5OH квалификации ОСЧ, а также специально подготовленная дистиллированная вода. Степень чистоты полученной воды контролировали

по величине удельного электрического сопротивления, величина которого была не менее $(18 \div 20) \cdot 10^6$ Ом·см. Данные по статической диэлектрической проницаемости калибровочных жидкостей взяты из [2–7]. Статическая диэлектрическая проницаемость диэтилового эфира $C_4H_{10}O$ в интервале температур $(170 \div 300)$ К может быть представлена в виде уравнения, полученного из математической обработки опубликованных экспериментальных результатов [2–10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{C_4H_{10}O} = & 4,7750427 - 0,023933(T-273,15) + \\ & + 1,348035 \cdot 10^{-4}(T-273,15)^2 - \\ & - 1,084797 \cdot 10^{-6}(T-273,15)^3 \end{aligned} \quad (1)$$

Стандартное отклонение $\sigma = 0,037349$, $R^2 = 0,999575$.

Статическая диэлектрическая проницаемость этилового спирта C_2H_5OH в интервале температур $(285 \div 345)$ К может быть представлена в виде уравнения, полученного из математической обработки опубликованных экспериментальных результатов [2, 3, 11–14]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{C_2H_5OH} = & 31,748201 - 0,390197(T-273,15) + \\ & + 4,8068 \cdot 10^{-3}(T-273,15)^2 - \\ & - 2,554588 \cdot 10^{-5}(T-273,15)^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Стандартное отклонение $\sigma = 0,502725$, $R^2 = 0,954628$.

Статическая диэлектрическая проницаемость воды H_2O в интервале температур $273 \div 373$ К может быть представлена в виде приведенного в [15, 16] уравнения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{H_2O} = & 87,74 - 0,4008(T-273,15) + \\ & + 9,398 \cdot 10^{-4}(T-273,15)^2 + \\ & + 1,41 \cdot 10^{-6}(T-273,15)^3 \end{aligned} \quad (3)$$

Измерения проводились при первоначальном полном сжатии сильфона *b* и последующем смещении микрометрического винта микроскопа в одну сторону вверх.

Систематическая погрешность установления (задания) и измерения уровня калибровочной жидкости внутри фрагмента ТТ над поверхностью емкостного датчика за счет втягивания части смачивающей жидкости внутрь измерительного капилляра при капиллярном поднятии и не мгновенного закрытия вентиля 25 не превышает величину 0,001 мм.

Существенным обстоятельством, повышающим точность измерения толщины слоя жидкости при калибровке емкостного датчика является систематическое движение измерительного стержня 14 микроскопа МГ 15 в одном направлении (вверх) при всех измерениях, что уменьшает влияние люфта ходового винта микроскопа 15.

Емкость датчика измеряли с помощью моста переменного тока Р5083 с абсолютной погрешностью менее 10^{-4} пФ. Температуру по термистору СТЗ–19 и термо- ЭДС термопары измеряли с помощью вольтметра АКIP В7–78 с погрешностью 0,1 мкВ.

Далее производят следующий сдвиг вверх измерительного стержня 14 микроскопа МГ 15 на заданную величину, при этом торец измерительного стеклянного капилляра δ поднимается вертикально вверх на эту величину.

Результаты калибровки емкостного датчика приведены на рис. 2. Полиномиальное уравнение, описывающее значения емкости «затопленного» датчика в зависимости от толщины h , мкм, пленки жидкости над его измери-

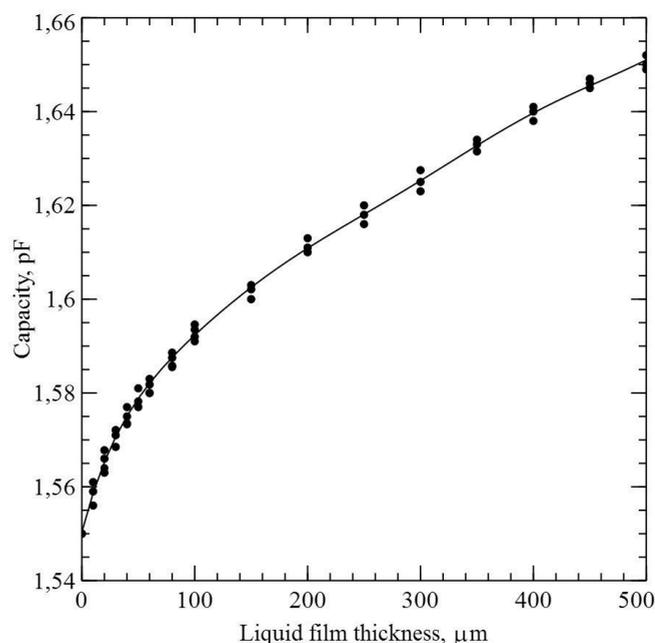


Рис. 2. Результаты калибровки емкостного датчика в «затопленном» состоянии при малых значениях толщины слоя калибровочной жидкости (воды)

тельной поверхностью в интервале h : $0 \div 500$ мкм выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} C(h) = & -1,5214489 \cdot 10^{-21} \cdot h^8 + 3,55801 \cdot 10^{-18} \cdot h^7 - \\ & - 3,4379488 \cdot 10^{-15} \cdot h^6 + 1,7798185 \cdot 10^{-12} \cdot h^5 - \\ & - 5,3799085 \cdot 10^{-10} \cdot h^4 + 9,8081323 \cdot 10^{-8} \cdot h^3 - \\ & - 1,1026746 \cdot 10^{-5} \cdot h^2 + 9,3290716 \cdot 10^{-4} \cdot h + 1,5503258. \end{aligned} \quad (4)$$

Размерность $C(h)$ в пФ (pF), h в мкм (μm), стандартное отклонение $\sigma = 0,0015552$, $R^2 = 0,9968854$.

Емкостный датчик. Чувствительность и дальное действие

Емкостный метод измерений толщины пленки (слоя) жидкости в каналах обладает высокой чувствительностью, что подтверждается многими примерами. В простейшем варианте применения плоского емкостного датчика пластины конденсатора размещают непосредственно в противоположных стенках рабочего участка вертикально ориентированного прямоугольного канала. Пластины датчика устанавливаются заподлицо с плоскими вертикальными стенками канала, которые параллельны вертикально движущейся пленке исследуемой жидкости, и образуют закрытый плоский конденсатор. Чувствительность такого закрытого конденсатора, по данным Алексеенко [17], тем больше, чем полнее пленка исследуемой жидкости толщиной h заполняет расстояние b между пластинами конденсатора и соответственно чем меньше паровой (газовый) зазор $b - h$ между второй пластиной конденсатора и внешней поверхностью пленки. Величина чувствительности емкостного датчика близка к гиперболической и может быть записана в следующем виде:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} \frac{\partial C_{\Sigma}}{\partial z} \approx \frac{1}{b-h} \quad (5)$$

В емкостном датчике открытого типа, в котором искривленное электрическое поле сосредоточено в окружающем торцевые поверхности измерительных электродов пространстве, величина напряженности поля и чувствительность датчика резко убывает с увеличением расстояния. Поскольку две измерительные торцевые поверхности электродов датчика открытого типа содержат электрические заряды противоположного знака, то вместе они образуют поле дипольного типа, напряженность которого убывает пропорционально кубу (третьей степени) расстояния от излучающих поверхностей электродов [18]. Это ограничивает дальное действие нашего емкостного датчика с открытыми электродами.

Мы провели сопоставление чувствительности открытого емкостного датчика, полученной на основе опытных результатов его калибровки при малых толщинах пленки рабочей жидкости, с расчетным значением на основе гиперболической функции из уравнения (5), в котором величина производной $1/C_{\Sigma} \times \partial C_{\Sigma} / \partial z$ при нулевой толщине пленки считалась равной экспериментальному значению. На рис. 3 показаны результаты этого сопоставления. Кривая 1 — экспериментальные результаты калибровки, 2 — гиперболическая функция подобная (5), при нулевых значениях толщины пленки совпадающая с экспериментальным значением.

Видно, что при малых толщинах пленки до $80 \cdot 10^{-6}$ м (80 мкм) значения производной, полученные на основе опытных результатов действительно меньше и спадают более резко по сравнению с гиперболической функцией подобной (5). При толщинах пленки жидкости более 100 мкм чувствительность открытого емкостного датчика на основе опытных данных систематически превосходят значения чувствительности закрытого датчика на основе гиперболической функции из уравнения (5).

Полином аппроксимации чувствительности открытого емкостного датчика при малых толщинах измеряемой пленки жидкости (воды) выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{\Sigma}} \frac{dC_{\Sigma}}{dh} = & -8,504963 \cdot 10^{-20} \cdot h^9 + 2,435316 \cdot 10^{-16} \cdot h^8 - \\ & -2,9938113 \cdot 10^{-13} \cdot h^7 + 2,0683075 \cdot 10^{-10} \cdot h^6 - \\ & -8,8226596 \cdot 10^{-8} \cdot h^5 + 2,4008748 \cdot 10^{-5} \cdot h^4 - 0,0041483 \cdot h^3 + \\ & + 0,4367441 \cdot h^2 - 25,6511436 \cdot h + 758,0653834 \end{aligned} \quad (6)$$

Размерность $1/C_{\Sigma} \cdot dC_{\Sigma}/dh$ в $1/м$, h в м, стандартное отклонение $\sigma = 0,002732$, $R^2 = 0,9875829$.

Измерение температуры термистором

Калибровка термисторов СТЗ–19 была осуществлена ранее [19–22], все калибровочные измерения проведены в стационарном режиме с изотермической оболочкой в интервале температур $273,15 \div 473,15$ К ($0 \div 200$ °С). Сущность калибровки состоит в точном измерении потенциометрическим методом сопротивления термистора R_c , Ом, в стационарном состоянии при заданной температуре T , К, определяемой по образцовому платиновому термометру сопротивления ПТС-10. Все измерения температуры, выполненные на термометре сопротивления ПТС-10, сделаны при величине измерительного тока 1 мА

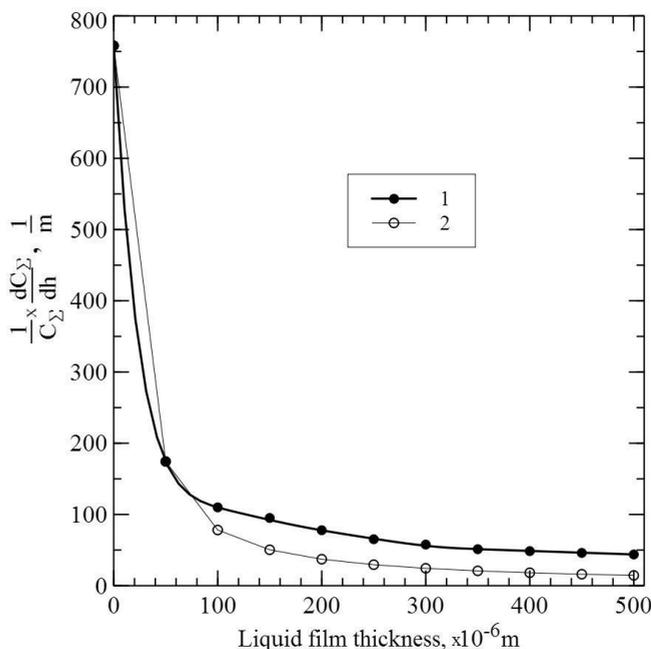


Рис. 3. Производная градуировочной кривой емкостного датчика при малых толщинах пленки жидкости (воды): 1 — экспериментальные результаты; 2 — гиперболическая функция, подобная приведенной в уравнении (5)

($1 \cdot 10^{-3}$ А), выделяемая при этом тепловая мощность равна $W_{ПТС} = (10 \div 17) \cdot 10^{-6}$ Вт. Тепловая мощность W_c , выделяемая на термисторе измерительным током, при всех калибровочных испытаниях постоянна и равна $20 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Всего при калибровке получено более 500 экспериментальных точек за 21 цикл калибровочных измерений, из них был сформирован массив исходных данных температур T , и логарифмов сопротивлений термистора $\ln R_c$. Максимальная случайная погрешность измерения температуры термометром не превышала $(2-3) \cdot 10^{-3}$ К, сопротивления термистора $5 \cdot 10^{-4}$ Ом.

На рис. 4 приведены результаты одного из 21 цикла калибровочных измерений сопротивления термистора R_c в зависимости от температуры, при этом для удобства дальнейшего анализа график представлен в виде функции обратной температуры $10^4/T$, $1/К$, от $\ln R_c$. Эта зависимость близка к линейной, но в области повышенных температур $T \sim 473$ К, где $\ln R_c \sim 4 \div 5$, и в области пониженных температур $T \sim 273$ К, где $\ln R_c \sim 9 \div 10$, наблюдаются отклонения. При средних температурах, в интервале значений $\ln R_c \sim 6 \div 8$, существует точка перегиба.

Функциональная зависимость электрического сопротивления оксидного полупроводникового термистора R_c от температуры T достаточно сложна, и в первом приближении ее представляют в виде сопротивления идеального полупроводника со строго одинаковым количеством дырок и носителей заряда, в экспоненциальном виде

$$R_c = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (7)$$

где R_c — электрическое сопротивление термистора, Ом, при температуре T , К;

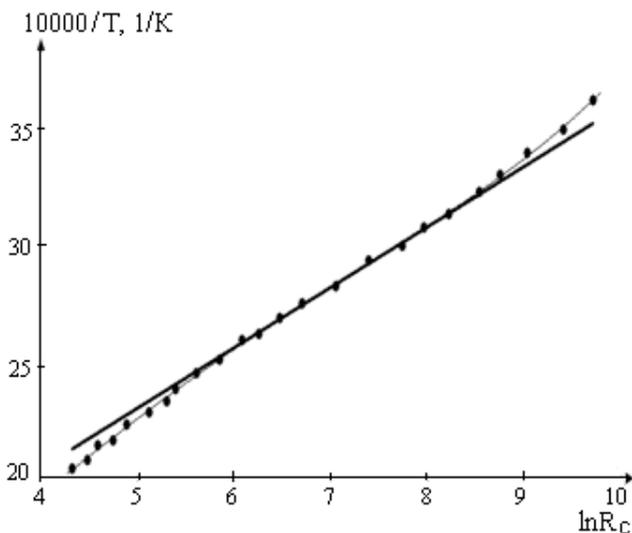


Рис. 4. Экспериментальная зависимость логарифма сопротивления термистора СТЗ–19 от обратной температуры $10^4/T$, 1/К. Прямая линия — расчет по уравнению (7), график кривой — расчет по уравнению (9)

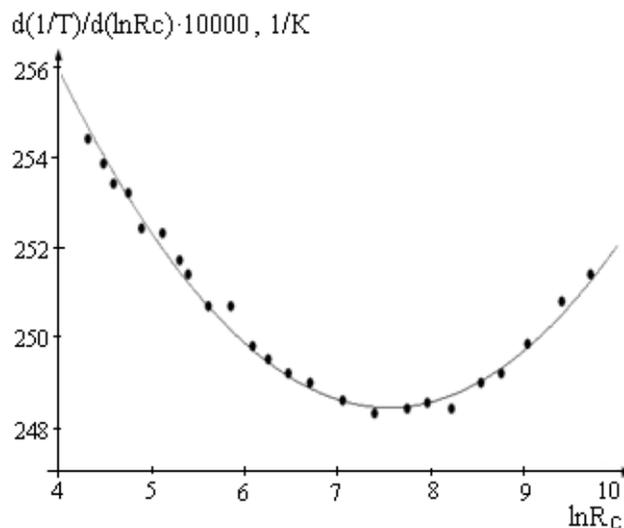


Рис. 5. Расчетная зависимость производной $d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4$, 1/К, в зависимости от логарифма сопротивления $\ln R_C$ термистора СТЗ–19

A — сопротивление термистора, Ом, при бесконечной большой температуре;

B — параметр чувствительности термистора, в общем случае также зависящий от температуры, 1/К. При температуре $T = 274,15$ К (1°C) сопротивление термистора СТЗ–19 $R_C \sim 30$ кОм, при температуре $T = 473,15$ К (200°C) $R_C \sim 50$ Ом. Величина $B \sim 4000$ 1/К, $A \sim 0,013$ Ом. После логарифмирования (7) получаем

$$\frac{1}{T} = -\frac{1}{B} \cdot \ln A + \frac{1}{B} \cdot \ln R_C \quad (8)$$

Для точного определения точки перегиба экспериментальной кривой на рис. 9 и уточнения уравнения (8) была вычислена производная $d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4$, 1/К, при этом анализировался весь массив экспериментальных точек. Значения производной $d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4$, 1/К, рассчитанные по результатам одного цикла измерений сопротивления термистора показаны на рис. 5.

По результатам численного дифференцирования [36–39] всего массива экспериментальных точек, минимум кривой определен нами при значении $\ln R_{C \min} = 7,63 \pm 0,01$, что соответствует температуре точки перегиба (inflection point) $T_{\text{inf}} = 336,34$ К ($63,19^\circ\text{C}$). После разложения производной $d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4$, 1/К в ряд в окрестности точки минимума и интегрирования по $\ln R_C$, было получено полиномиальное уравнение четвертой степени, связывающее температуру и логарифм сопротивления термистора следующим образом:

$$\frac{1}{T} = A_0(\tau_d) + A_1(\tau_d)(\ln R_C - 7,63_2) + A_2(\tau_d)(\ln R_C - 7,63_2)^2 + A_3(\tau_d)(\ln R_C - 7,63_2)^3 + A_4(\tau_d)(\ln R_C - 7,63_2)^4 \quad (9)$$

где $A_i(\tau_d)$ — коэффициенты разложения с учетом времени дрейфа (временного дрейфа) τ_d , расчет коэффициентов выполняли после каждого из 21 цикла калибровочных измерений. Расчет коэффициентов $A_i(\tau)$ был

проведен с помощью стандартной процедуры метода наименьших квадратов (МНК), все подробности изложены в [19–22].

Для контроля качества калибровок и их долговременной стабильности, после каждого из 21 определения набора коэффициентов $A_i(\tau_d)$ из выражения (9), были вычислены производные $d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4$. С разбросом не более $\sigma \sim 5 \cdot 10^{-7}$ все значения производных лежат на кривой рис. 5. Это означает, что точка перегиба $T_{\text{inf}} = 336,34$ К ($63,19^\circ\text{C}$) или точка минимума производной (рис. 6) $\ln R_{C \min} = 7,63 \pm 0,01$, являются инвариантом градуировки термистора СТЗ–19 при нагреве до 473 К и при более низких температурах. Значения коэффициентов приведены ниже:

$$\begin{aligned} A_0 &= -6,21997 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_d + 29,824488 \\ &\text{при нагреве до } 473 \text{ К} \\ A_1 &= 4,051207 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_d + 2,489278 \\ &\text{при нагреве до } 473 \text{ К} \\ A_2 &= -2,2266277 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_d + 0,0022733 \\ &\text{при нагреве до } 473 \text{ К} \\ A_3 &= -3,98635 \cdot 10^{-8} \cdot (\tau_d)^2 + 1,771915 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_d + 6,3241 \cdot 10^{-5} \\ &\text{при нагреве до } 473 \text{ К.} \end{aligned} \quad (10)$$

Абсолютные погрешности расчета коэффициентов $A_i(\tau)$ составляют:

$$\delta A_0 \sim 1 \cdot 10^{-3}; \delta A_1 \sim 1 \cdot 10^{-3}; \delta A_2 \sim 1 \cdot 10^{-4}; \delta A_3 \sim 1 \cdot 10^{-5}.$$

Подстановка коэффициентов $A_i(\tau)$, вычисленных при нагреве термистора до 473 К и до более низких температур в уравнении (9), снижает разброс производных $d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4$, 1/К на кривой рис. 5 до величины $\sigma \sim (2 \div 3) \cdot 10^{-7}$, и позволяет более точно определить точку минимума $\ln R_{C \min} = 7,63_2 \pm 0,01$, тем самым уменьшить погрешность расчета температуры при проведении измерений термистором СТЗ–19.

Применение полиномиального уравнения четвертой степени (9) с привязкой температуры к точке перегиба функциональной зависимости логарифма сопротивления термистора с учетом дрейфа коэффициентов (10) во времени $\ln R_{C_{\min}} = 7,63_2 \pm 0,01$, позволяет расширить диапазон и повысить точность определения температуры. Погрешность определения температуры (разностей температур) термистором СТЗ–19 с помощью уравнения четвертой степени (9) с учетом нахождения точки перегиба не превышает $(3 \div 5) \cdot 10^{-4} \text{ К}$.

Теплоемкость термистора $C_c \sim 0,3 \text{ Дж/К}$, величина перегрева измерительным током не превышает $\Delta T_c \sim 10^{-2} \text{ К}$, и учитывается при всех измерениях.

Емкостный датчик. Проведение измерений

Для проведения измерений толщины пленки рабочей жидкости внутри ТТ был применен известный метод регистрации изменений электрической емкости ΔC емкостного датчика при изменении толщины пленки жидкого конденсата на его поверхности. Из-за малых величин изменения емкости датчика при пленочной конденсации пара внутри ТТ, определение толщины образовавшейся пленки конденсата рабочей жидкостью проводили путем измерения разности частот двух высокочастотных генераторов, — измерительного и опорного, вместе составляющих основную часть емкостного преобразователя.

Используя современную импортную элементную базу, был разработан и изготовлен преобразователь «изменение емкости — разностная частота генераторов», совмещенный с измерительным и опорным емкостными датчиками и размещенный при постоянной температуре в вихревом проточном калориметре [23–25].

Оба генератора высокой частоты, измерительный и опорный выполнены на двух одинаковых широкополосных усилителях EL4551 (INTERSIL), обеспечивающих усиление сигналов частотой до 90 МГц. Схема каждого генератора построена на последовательном LC колебательном контуре, параллельно емкости которого подклю-

чают измерительный и опорный емкостной датчики, установленные в измерительной и опорной ТТ. Схемы генераторов выполнены идентичными, за исключением небольшой подстроечной емкости (варикапа) на опорном генераторе, поэтому при воздействии дестабилизирующих факторов характер и величину изменения частоты в обоих генераторах можно считать одинаковыми. Все подробности изготовления и калибровки преобразователя «изменение емкости — разностная частота генераторов» как целого приведены в [25].

После прогрева аппаратуры, включения генераторов и достижения температурного равновесия термисторов в измерительной и опорной ТТ производится подстройка частоты опорного генератора к частоте измерительного. До включения подогрева испарителей и начала работы ТТ разность частот устанавливается близкой к нулю, частота измерительного генератора всегда меньше частоты опорного генератора на небольшую величину 0,2 кГц. В дальнейшем при образовании пленки конденсата частота измерительного генератора уменьшается, при этом разность частот увеличивается и не меняет знак. Разность температур двух термисторов при равновесии не более $1 \cdot 10^{-3} \text{ К}$.

Несмотря на термостабилизацию измерительного и опорного генераторов в проточном калориметре с водой при постоянной температуре, минимальную длину проводов, тщательное экранирование и термостатирование всех проводов, разностная частота Δf генераторов медленно дрейфует примерно на 0,25 кГц при проведении измерений. Этот дрейф определяет наименьшее значение изменения емкости $\sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ пФ}$, которое может измерить наша аппаратура.

Частоты зависимости диэлектрической проницаемости диэтилового эфира малы в наших измерениях, тангенс угла диэлектрических потерь при частотах $\sim 30 \text{ МГц}$ не более 10^{-2} [2].

Результаты измерений толщины и температуры пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ представлены на рис. 6 и рис. 7.

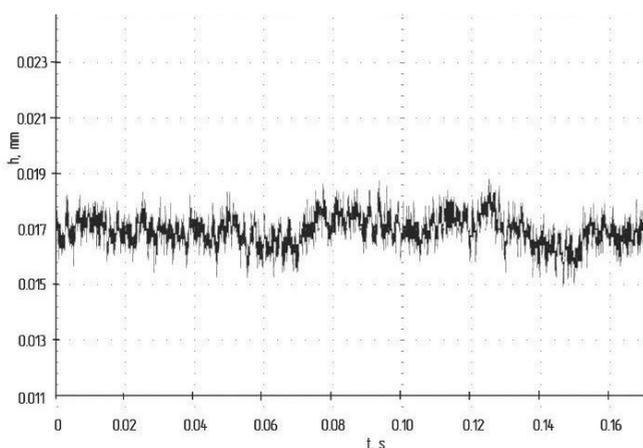


Рис. 6. Осциллограмма толщины пленки диэтилового эфира на измерительной поверхности емкостного датчика, совпадающего с поверхностью конденсации в короткой ТТ. Явно выраженных периодических течений на поверхности конденсации внутри ТТ нет. Величина пульсаций толщины пленки не превышает 0,002 мм

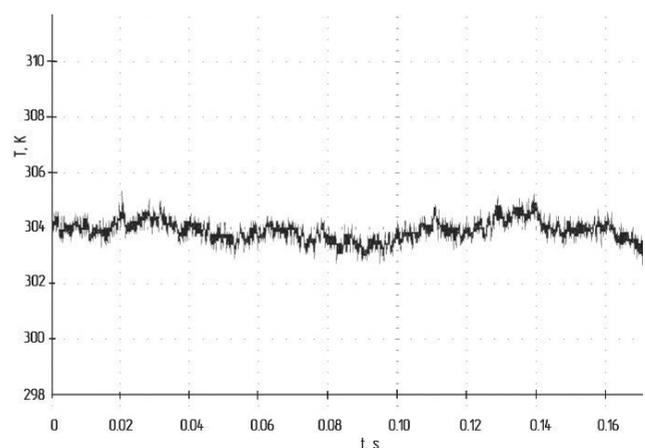


Рис. 7. Осциллограмма температуры пленки диэтилового эфира на измерительной поверхности емкостного датчика, совпадающего с поверхностью конденсации в короткой ТТ

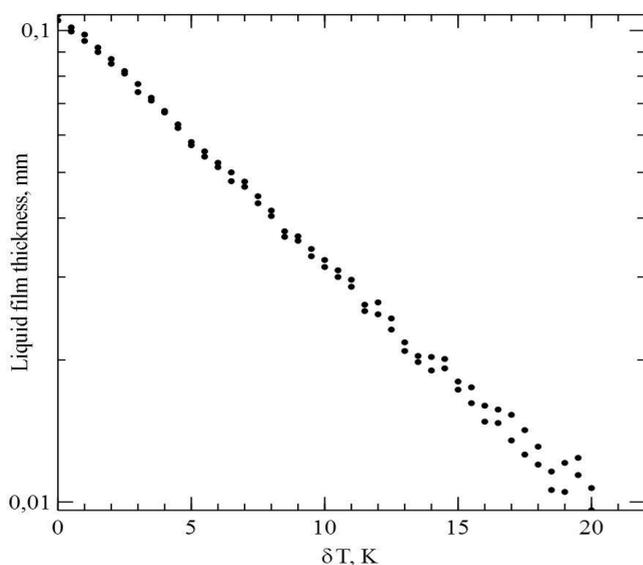


Рис. 8. Зависимость усредненных значений толщины пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации от величины перегрева испарителя ТТ относительно температуры кипения эфира $\delta T = T_B - T$, К, в полулогарифмической системе координат

Величина пульсаций температуры пленки не превышает 1 К. Явно выраженных периодических макроскопических течений на поверхности конденсации внутри ТТ нет. Результаты измерений усредненных во времени значений толщины слоя диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель приведены на рис. 8. Получена нелинейная резко уменьшающаяся зависимость толщины пленки жидкого конденсата в зависимости от перегрева испарителя ТТ, абсолютная погрешность измерений толщины не более $2 \cdot 10^{-3}$ мм.

Хорошо видно, что разброс экспериментальных точек начиная с перегрева испарителя $\delta T = (10-11)$ К увеличивается, что связано с началом кипения и образованием влажного пара с микрокаплями жидкости в паровом канале ТТ. Минимальное значение измеряемой толщины пленки конденсата на поверхности открытого емкостного датчика (поверхности конденсации), доступное нашей аппаратуре составляет $2 \cdot 10^{-3}$ мм.

Выводы

1. Емкостный метод может быть применен для измерения мгновенных и усредненных во времени значений толщины пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации в коротких низкотемпературных ТТ.

2. Калибровка открытого емкостного датчика должна быть проведена в условиях, идентичных условиям измерений в работающей ТТ. Для калибровки необходимо применять фрагмент ТТ, в нашем случае изображенный на рис.6, с идентичным распределением металла вокруг емкостного датчика.

3. Для повышения точности измерений толщины пленки конденсата рабочей жидкости необходимо проводить калибровку емкостного преобразователя целиком

на фрагменте ТТ и определять функциональную зависимость разности частот преобразователя от толщины пленки (слоя) калибровочной жидкости.

Обозначения

A_i — коэффициенты разложения характеристической функции термистора;

$C(h)$ — емкость датчика со слоем жидкости на измерительной поверхности, пФ;

h — толщина пленки (слоя) измеряемой жидкости, мкм;

ϵ — диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости;

τ_d — время дрейфа коэффициентов разложения функции термистора, мес;

Литература

1. 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.
2. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник ГСССД. — М.: Издательство Стандартов, 1972. 412 с.
3. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных // Государственное изд-во физико-математической литературы. М., 1962. 247 с.
4. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. Кирилина И. К. — М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
5. Fuoss R. M. Pressure dependence of dielectric constant and density of liquids // Journal of Physical Chemistry 1968 v. 72. pp. 1057–1064
6. Freeman G. R. Dielectric constant against temperature for 43 liquids // Journal of Chemical Thermodynamics 1986.v. 18. No 2. p. 221–234.
7. Schaaf A. Mitteilung beitrage zur problrmatik des einsetzes von kunststoffbehaltern fur flussige arzneizubereitungen. Pharmazie 1974. v. 29 pp. 708–711.
8. Nespoli W. Beschreibung einer kristallgesteuerten resonanz apparatur // Zeitschrift fur Physikalische Chemie 1932.16 Band pp. 221–233.
9. Moll W. L. H. Dielectrical study of the effect of organic solvent on high- molecular substances// Kolloidchemische Beihefte. 1939/ Bd.49. p. 1–74.
10. Kyropoulos S. Die druckabhangigkeit der dielektrizitatskonstante einiger flussigkeiten bis zu 3000kg/cm². Zeitschrift fur Physik 1926. Bd. 40. p. 507–520.
11. Winkler C. A. Solvent effect on iodide exchange// Canadian Journal of Chemistry 1951 v. 29. pp. 790–803.
12. Patil P. B. Dielectric measurements on methyl acetate + alcohol mixtures using the time domain technique// Journal of Chemical Engineering Data 2000 v. 45. pp. 917–919.
13. Patil P. B. Temperature dependent dielectric relaxation study of ethyl acetate- alcohol mixtures using the time domain technique// Journal of Molecular Liquids 2001 v. 94. pp. 27–36.
14. Mehrotra S. C. Static dielectric constant and relaxation time for the binary mixture of water, ethanol, N,N-dimethylformamide, N,N-dimethylsulphoxide, and N,N-dimethylacetamide with

- 2-methoxyethanol // Bulletin of the Korean Chemical Society 2001. v. 22. pp. 357–361
15. *Fernandes D. P., et al.* A formulation for the static permittivity of water and steam at temperatures from 238K to 873K at pressures up to 120 MPa, including derivatives and Debye-Huckel coefficients // Journal of Physical and Chemistry Reference Data. 1997. v. 26, pp. 1125–1166.
 16. *Fernandes D. P., et al.* A database for the static dielectric constant of water and steam // Journal of Physical and Chemistry Reference Data 1995. v.24, №1, pp. 33–69.
 17. *Алексеев С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г.* Волновое течение пленок жидкости. — Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
 18. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. 621 с.
 19. *Серяков А. В.* Измерение температуры термисторами // Вестник СибГАУ 2013. Вып. 1 (47). С. 167–172.
 20. *Серяков А. В.* Повышение точности измерения температуры термисторами // Датчики и Системы. 2013. №1. С. 38–42.
 21. *Seryakov A. V.* A new method for temperature measurement using thermistors // International Journal of Engineering Research & Technology 2013, v. 2, No 7, pp. 444–454.
 22. *Seryakov A. V.* A universal method for temperature measurement using thermistors // National Journal of Engineering and Technology Research. Academia Publishing. 2013, v. 1 (1), pp. 014–020.
 23. *Seryakov A. V.* The Application of Capacitance Transducer for Measuring Local Thickness of Condensate Film in Low-Temperature Range Heat Pipes // International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application 2016, v. 4, N 1, pp. 1–13.
 24. *Серяков А. В.* Экспериментальное определение локальной толщины пленки конденсата рабочей жидкости в коротких тепловых трубах // Ползуновский Вестник. 2016. № 2. С. 73–86.
 25. *Seryakov A. V.* The Study of Condensation Processes in the Low-Temperature Short Heat Pipes with a Nozzle-Shaped Vapour Channel // Engineering. 2017, v. 9, pp. 190–240. DOI: 10.4236/eng.2017.92010

Сведения об авторах

Серяков Аркадий Владимирович

к.ф.-м.н., ст. научн. сотр. АО «НПП «СТАРТ», 173021, Великий Новгород, ул. Нехинская 55, seryakovAV@yandex.ru

Михайлов Юрий Евгеньевич

ведущий инженер АО «НПП «СТАРТ», 173021, Великий Новгород, ул. Нехинская 55, seryakovAV@yandex.ru

Шакшин Сергей Леонидович

ведущий инженер АО «НПП «СТАРТ», 173021, Великий Новгород, ул. Нехинская 55, seryakovAV@yandex.ru

Information about authors

Seryakov Arkadiy Vladimirovich, Ph. D., senior researcher JSC «Scientific-Production Enterprise «START», 173021 Russia, Velikiy Novgorod, Nehinskaya st. 55, seryakovAV@yandex.ru

Mikhailov Yury Evgenyevich, Leading engineer JSC «Scientific-Production Enterprise «START», 173021 Russia, Velikiy Novgorod, Nehinskaya st. 55, seryakovAV@yandex.ru

Sakchin Sergey Leonidovich, Leading engineer JSC «Scientific-Production Enterprise «START», 173021 Russia, Velikiy Novgorod, Nehinskaya st. 55, seryakovAV@yandex.ru



Международная агропромышленная выставка-ярмарка АГРОФОРУМ-2017

Выставка «АГРОФОРУМ»

22–25 августа 2017 г.

Ярмарка региональных продуктов «АГРОФОРУМ»

19–27 августа 2017 г.

<http://agrorus.expoforum.ru/>

ВЫСТАВКА. РАЗДЕЛЫ:

- Импортозамещение;
- Инновационные научные разработки и технологии;
- Сельскохозяйственная техника;
- Оборудование для переработки и хранения сельскохозяйственной и рыбной продукции;
- Животноводство, звероводство, птицеводство;
- Растениеводство. Удобрения. Семена. Теплицы;
- Продукты питания и напитки. Пищевые добавки;
- Экология и энергосбережение;
- Услуги для АПК;
- Агрострахование и сельскохозяйственная кооперация;
- Транспорт и логистика.
- **Программа «Сетевые и розничные закупки»**

Организатор выставки-ярмарки:

Министерство сельского хозяйства РФ,
при официальной поддержке Правительств
Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Контакты:

Тел./факс: +7 (812) 240-40-40, доб.235,231
E-mail: e.gabuchiya@expoforum.ru,
v.panch@expoforum.ru

Место проведения:

КВЦ «Экспофорум»

Адрес дирекции:

Петербургское шоссе 64, корпус 1,
конгресс-центр, ЭКСПОФОРУМ