

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

А.В. Серяков

Приведено описание автоматизированного емкостного измерителя локальной толщины пленки конденсата рабочей жидкости в коротких низкотемпературных тепловых трубах. Представлены конструкция, результаты калибровки открытых малогабаритных емкостных датчиков, а также электронная аппаратура, позволяющие проводить измерения локальной толщины пленки рабочей жидкости на поверхности конденсации внутри тепловых труб.

Измерены усредненные во времени значения толщины пленки конденсата в зависимости от тепловой нагрузки на капиллярно-пористый испаритель. Погрешность измерений не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ мм. Показано, что толщина пленки конденсата резко уменьшается с увеличением тепловой нагрузки на испаритель короткой низкотемпературной тепловой трубы.

Ключевые слова: емкостный датчик, толщина пленки конденсата, высокочастотные генераторы, тепловые трубы.

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.

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.

Применению емкостного метода для определения толщины слоя рабочей жидкости в трубах посвящено много исследований [1–12], 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 pF/м (0.01–0.03 pF/мм), что обычно достаточно при применении измерительной аппаратуры с чувствительностью измерения электрической емкости 10^{-4} pF и лучше.

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.

1. 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 [9]. Наш малогабаритный открытый емкостный датчик представляет собой дальнейшее развитие и совершенствование одного из вариантов приведенных там датчиков, на конструкцию которого получен патент [13]. 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 Лавая. В верхней крышке установлены два емкостных датчика. Подробное описание конструкции приведено в [14–16]. Длина ТТ 100 мм, диаметр 20 мм, критический диаметр сопла 4 мм, полный угол конфузорного участка 41° , полный угол диффузорного участка 8.5° , см. рисунок 1.

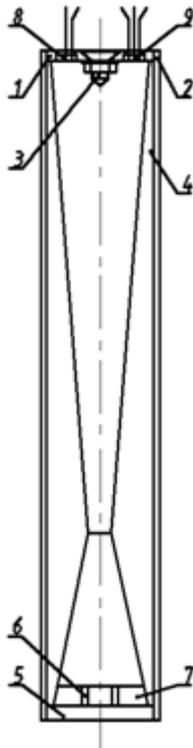


Рисунок 1 – Схема ТТ с установленными емкостными датчиками: 1 – плоская верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – конический турбулизатор; 4 – капиллярно-пористая вставка, задающая форму парового канала; 5 – плоская нижняя крышка; 6 – инжекторные каналы; 7 – капиллярно-пористый испаритель; 8, 9 – емкостные датчики, один из которых предназначен для измерения толщины пленки конденсата, а на электроды другого установлен чувствительный элемент термистора СТЗ-19 для измерения температуры пленки

Малогабаритный открытый емкостный датчик представляет собой устройство, внешний вид которого приведен на рисунке 2. Корпус датчика изготовлен в виде круглого плоского фланца диаметром 5.5 мм и толщиной 1 мм, с двумя сквозными цилиндрическими отверстиями диаметром 1.05 мм каж-

дое, расположенными на расстоянии 2 мм друг от друга симметрично относительно продольной оси фланца. В каждом сквозном отверстии выполнены вакуумно-плотные металлостеклянные спаи диаметром 1 мм по ОСТ 107.460092.002-86. В металлостеклянных 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.

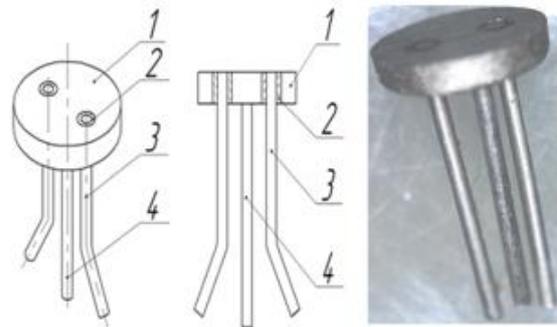


Рисунок 2 – Схема открытого малогабаритного емкостного датчика.
1 – фланец с измерительной поверхностью;
2 – стеклянные изоляторы;
3 – измерительные электроды с измерительными торцевыми поверхностями; 4 – заземляющий электрод

Фланец, измерительные и заземляющий электроды открытого емкостного датчика выполнены из ковара 29 НК по ГОСТ 10994-74 с ЛКТР $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, плотностью 8350 kg/m^3 , коэффициентом теплопроводности $19 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Вакуумно-плотные металлостеклянные спаи выполнены из стекла С48-2 с ЛКТР $\sim 4.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, плотностью 2550 kg/m^3 , коэффициентом теплопроводности $8.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ и температурой размягчения $\sim 843 \text{ K}$ (570°C). Диэлектрическая проницаемость стекла С48-2 $\epsilon_{\text{дл}} = 5.2$, тангенс угла диэлектрических потерь при частоте электромагнитных колебаний 10^6 Hz не превышает $28 \cdot 10^{-4}$, удельное электрическое сопротивление стекла $10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Верхняя поверхность шлифована и называется измерительной поверхностью датчика. Плоская измерительная поверхность датчиков шлифована с шероховатостью не более $0.63 \mu\text{m}$ по ГОСТ 2789-73, включая поверхность измерительных электродов и металлостеклянных спаев. Сопротивление электрической изоляции измерительных электродов более $2 \cdot 10^{11} \text{ Ом}$, электрическое сопротивление

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

электродов не более 0.7 Ом, рабочее напряжение до 500 В, напряжение пробоя ~ 1500 В, температура применения малогабаритных открытых емкостных датчиков 77 К ÷ 473 К (-196 °С ÷ +200 °С). Вакуумно-плотные металлоглазненные спаи емкостных датчиков конденсации характеризуются высокой механической прочностью, позволяющей выдерживать избыточное давление до 30 bar, и высоким показателем герметичности или малой вели-

чиной газовой проницаемости, не превышающей 10^{-9} mbar·л·с⁻¹ (10^{-5} Па·м³·с⁻¹). 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.

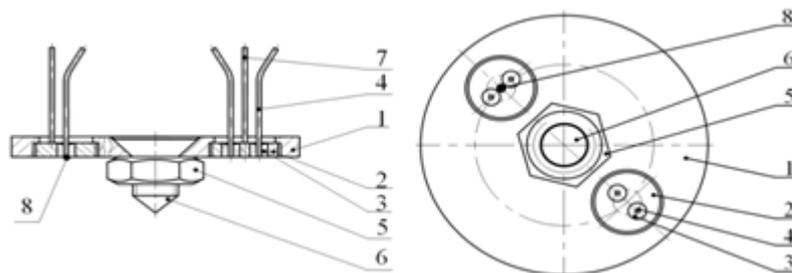


Рисунок 3 – Схема установки двух емкостных датчиков в верхнюю крышку ТТ: 1 – верхняя крышка ТТ, выполненная из стали 1Х18Н9Т; 2 – собственно емкостные датчики, по своему периметру приваренные к крышке 1 лазерной сваркой, при этом шлифованная измерительная поверхность датчиков заподлицо совпадает с внутренней поверхностью крышки; 3 – стеклянные изоляторы (металлоглазненные спаи); 4 – измерительные электроды обоих датчиков; 5 – крепежная гайка заполнительного узла ТТ, приваренная к внутренней поверхности крышки 1; 6 – запорный винт заполнительного 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

2. ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК. КАЛИБРОВКА

После изготовления датчика, установки его во фрагмент тепловой трубы и покрытия измеряющей поверхности тонким защитным диэлектрическим слоем Эпилама Автокон-0.5 по ТУ 2229-008-27991970-95, толщиной слоя которого равна $3 \cdot 10^{-9}$ м (30 Å), 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. Погрешность определения толщины слоя калибровочной жидкости 0.01 мм, погрешность измерения емкости датчика с учетом подводящих проводов при значениях толщины слоя жидкости ≤ 2 мм не превышает 10^{-4} pF. При больших значениях толщины в слое калибровочной жидкости возникают конвективные течения, увеличивающие погрешность измерений.

Все подробности калибровки емкостных

датчиков приведены в [15–16], полученные результаты представлены на рисунке 4. Калибровка емкостных датчиков была проведена в перевернутом в виде полости фрагменте ТТ при температуре $T = (298 \pm 0.03)$ К (25 °С). Прямая шкала от 0 до 8 мм предназначена для «затопленного» датчика, кривая 1. Обратная шкала от 8 до 0 мм предназначена для «сухого» датчика, кривая 2, рисунок 4.

Хорошо видно, что «сухой» емкостный датчик имеет максимальную чувствительность в области средних и больших толщин слоя калибровочной жидкости, а «затопленный» в области малых толщин. Видно, что с ростом толщины слоя калибровочной жидкости в «затопленном» варианте измерений емкость датчика приближается к постоянному значению. Начиная с толщины слоя жидкости $h = 2$ мм, равному расстоянию между электродами, прирост емкости датчика резко уменьшается, а после достижения толщины слоя $h = 3.5$ мм прирост практически сводится к нулю. Это означает нечувствительность емкостного датчика в этом

диапазоне толщин слоя жидкости и переход к режиму насыщения. Переход к режиму насыщения обусловлен замыканием электрического

поля внутри глубины проникновения (распространения) поля $\Lambda \sim 3.5$ мм и практически полном отсутствии поля вне этой глубины Λ .

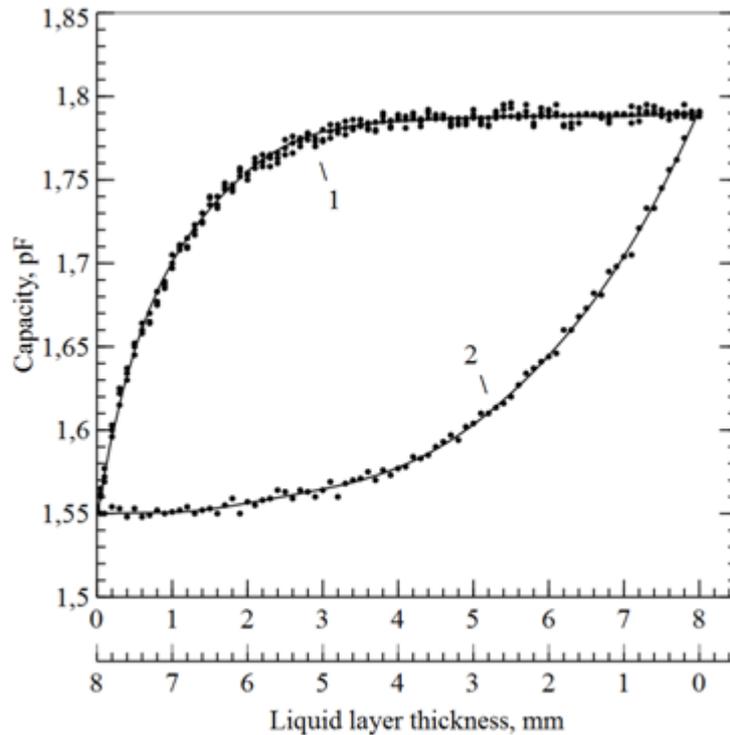


Рисунок 4 – Результаты калибровки емкостного датчика по воде. 1 – «затопленный» емкостный датчик, слой калибровочной жидкости (воды) находится непосредственно над измерительной поверхностью датчика; 2 – «сухой» емкостный датчик, находящийся в перевернутом положении над поверхностью калибровочной жидкости (воды), приближающейся к измерительной поверхности датчика

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 $(18-20) \cdot 10^6$ Ом·см. Данные по статической диэлектрической проницаемости калибровочных жидкостей взяты из [17–22]. Для воды использованы результаты из наиболее полной на сегодняшний день информационной базы [21–22], и в интервале температур 273–373 К величина статической диэлектрической проницаемости ϵ может быть представлена в виде приведенного там уравнения, где T – температура, К:

$$\begin{aligned} \epsilon = & 87.74 - 0.4008(T - 273.15) + \\ & + 9.398 \cdot 10^{-4} (T - 273.15)^2 + \\ & + 1.41 \cdot 10^{-6} (T - 273.15)^3 \end{aligned} \quad (1)$$

Полиномиальное уравнение, описывающее значение емкости «затопленного» датчика $C(h)$ в зависимости от толщины h слоя воды над его измерительной поверхностью в интервале 0–4 мм выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} C(h) = & -0.0014321 \cdot h^5 + 0.016424 \cdot h^4 \\ & - 0.0739922 \cdot h^3 + 0.1775185 \cdot h^2 \\ & - 0.2706602 \cdot h + 1.5498626. \end{aligned} \quad (2)$$

Размерности $C(h)$ в pF, h в мм, стандартное отклонение $\sigma = 0.0014989$, $R^2 = 0.9988017$. Полиномиальное уравнение, описывающее значения емкости «сухого» датчика $C(h)$ в зависимости от расстояния h между измерительной поверхностью датчика и приближающейся к ней поверхностью калибровочной жидкости, может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} C(h) = & -3.2993481 \cdot 10^{-8} \cdot h^9 + 2.2164926 \cdot 10^{-8} \cdot h^8 \\ & - 2.0864424 \cdot 10^{-5} \cdot h^7 + 3.7632323 \cdot 10^{-4} \cdot h^6 \\ & - 0.002947 \cdot h^5 + 0.0119058 \cdot h^4 - 0.0249701 \cdot h^3 \\ & + 0.0226569 \cdot h^2 - 0.0070937 \cdot h + 1.5505609. \end{aligned} \quad (3)$$

Размерности $C(h)$ в pF, h в мм, стандартное отклонение $\sigma = 0.002732$, $R^2 = 0.9875829$.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Калибровка термисторов СТЗ-19 была осуществлена ранее [23–26], все калибровочные измерения проведены в стационарном режиме с изотермической оболочкой в интервале температур 273.15–473.15 К (0–200 °С).

3. ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК. КАЛИБРОВКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

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 жидкости проводили путем измерения разности частот двух высо-

кочастотных генераторов – измерительного и опорного, вместе составляющих основную часть емкостного преобразователя.

Преобразователь состоит из двух идентичных высокочастотных генераторов, смесителя и фильтра низких частот. Изменяющаяся при пленочной конденсации пара внутри основной ТТ емкость открытого емкостного датчика включена в колебательный контур измерительного генератора переменного тока ~ 33 МГц и изменяет его частоту. Такой же (тождественный) емкостный датчик опорной ТТ, заполненной неконденсирующимся воздухом включен в колебательный контур опорного генератора емкостного преобразователя. Основная ТТ, называемая измерительной заполнена диэтиловым эфиром, а опорная, полностью идентичная основной, заполнена осушенным воздухом с температурой точки росы ниже 233.15 К (-40 °С).

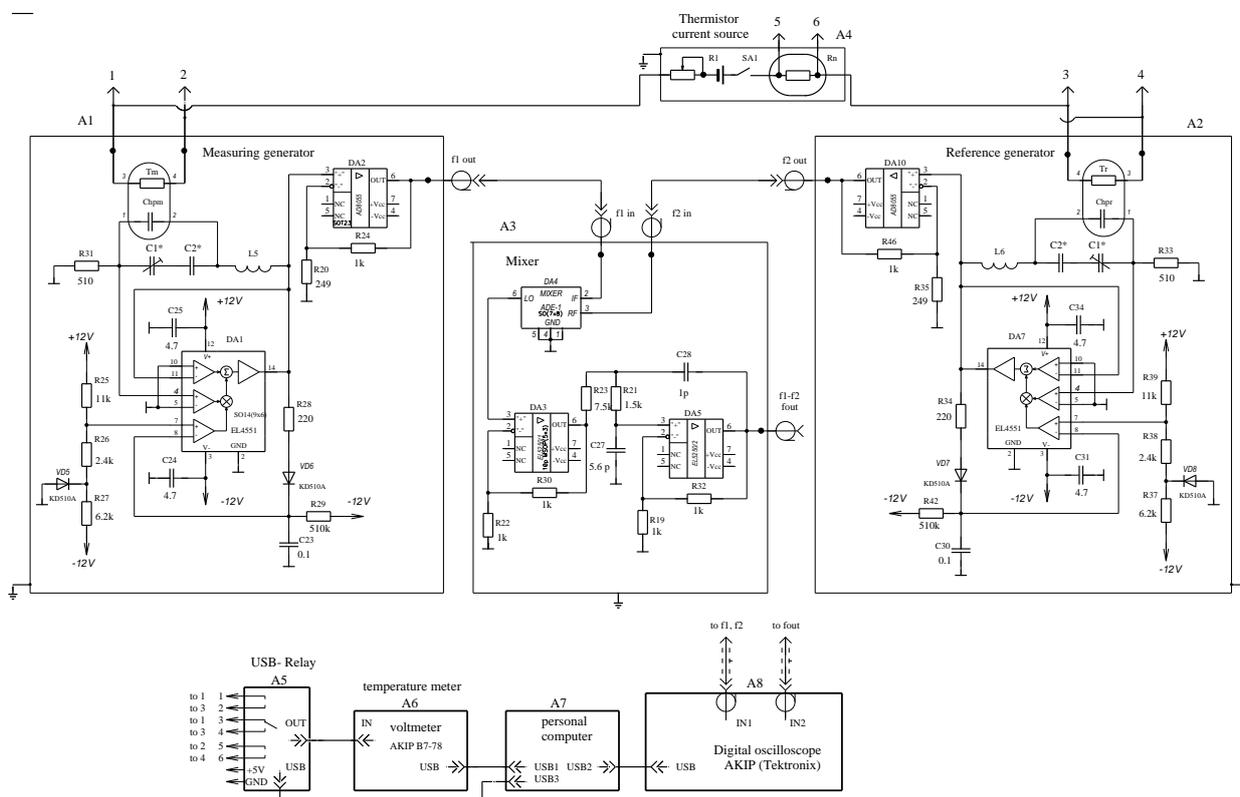


Рисунок 5 – Схема емкостного преобразователя, состоящего из измерительного и опорного генераторов, смесителя и фильтра низких частот, схемы измерения температуры с помощью двух термисторов, коммутатора USB-Relay, вольтметра AKIP B7-78, персонального компьютера PC и цифрового осциллографа AKIP Tektronix

С целью повышения точности измерения разности частот сигналов измерительного и опорного генераторов, оба генератора выполнены в едином схемном решении на одинаковых круглых печатных платах толщиной

0.3 мм непосредственно на плоских верхних крышках ТТ. Диаметр плат равен диаметру ТТ 20 мм, платы прижаты к поверхностям верхних крышек ТТ и жестко зафиксированы с помощью впаянных в них коротких выводов

емкостных датчиков и датчиков с микротермисторами. Таким образом, удается минимизировать все паразитные емкости электрического монтажа и монтажных соединений. Микросхемы, радиоэлементы и печатный монтаж покрыты в несколько слоев изолирующим составом на основе лака УР-231.

По периметру платы окружены цилиндрическими медными кожухами диаметром 20.5 мм, высотой 7 мм и толщиной стенки 0.25 мм, припаянными непосредственно к ТТ и герметично закрытыми крышками таким образом, чтобы была реализована модульная конструкция каждого из двух высокочастотных генераторов с изоляцией от внешней высокочастотной помехи (шума) и воды в проточном калориметре. Подробности калибровки приведены в [15–16]. Схема преобразователя представлена на рисунке 5.

Отвод тепла от тепловыделяющих элементов генераторов происходит за счет естественной конвекции, температура герметичных защитных медных кожухов равна температуре воды в вихревом проточном калориметре.

Верхние части обеих ТТ с генераторами помещены в вихревой проточный калориметр, см. рисунок 6, температура и расход воды на входе в который с помощью регулируемого термостата стабилизированы, $T = 298 \pm 0.03 \text{ K}$; $G = 0.13 \text{ г/с}$. Испарители ТТ с помощью резистивного нагревателя поддерживают при температуре, превышающей температуру кипения диэтилового эфира на величину перегрева $\delta T = T - T_B = 0 \div 20 \text{ K}$, при этом тепловая мощность заполненной диэтиловым эфиром ТТ не превышает 120 W.

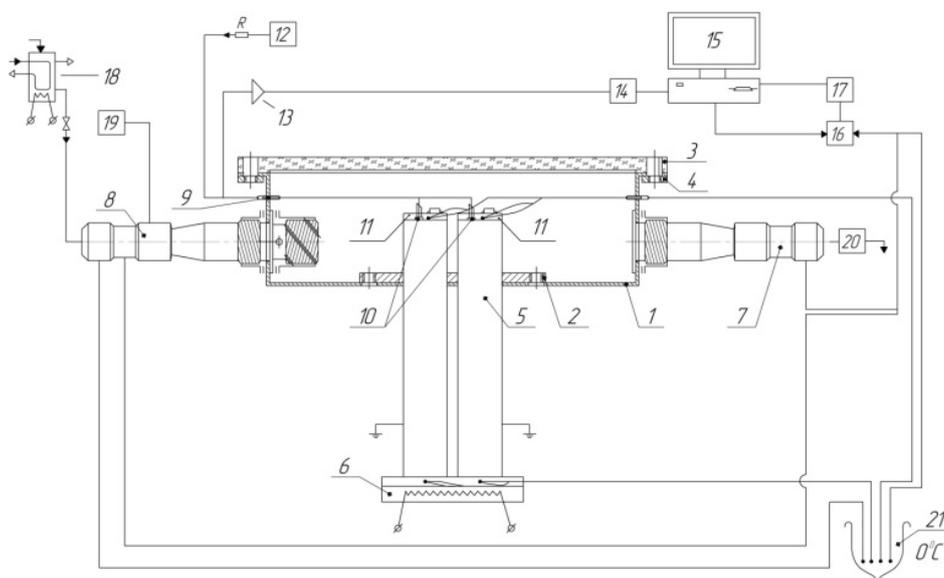


Рисунок 6. 1 – вихревой проточный калориметр; 2 – фланец крепления тепловых труб; 3 – стеклянная крышка; 4 – крепление крышки; 5 – тепловые трубы; 6 – резистивный нагреватель; 7 – выходной штуцер для воды; 8 – входной штуцер для воды; 9 – уплотнение измерительных проводов; 10 – емкостные датчики измерения толщины слоя конденсата; 11 – измерительный и опорный генераторы емкостного преобразователя; 12 – внешний кварцевый генератор; 13 – частотный детектор; 14 – фильтр низких частот; 15 – компьютер; 16 – коммутатор; 17 – вольтметр В7-34А; 18 – сосуд постоянного напора воды; 19 – генератор пузырьков воздуха; 20 – расходомер воды; 21 – сосуд Дьюара

Для повышения точности измерений толщины пленки конденсата внутри ТТ и исключения всех погрешностей, связанных с промежуточными преобразованиями «толщина пленки – изменение емкости датчика», «изменение емкости датчика – разностная частота генераторов», и «разностная частота генераторов – толщина пленки», была проведена калибровка всего емкостного преобразователя как целого с помощью фрагмента ТТ, в котором предварительно была проведена калибровка емкостного датчика. На внешней поверхности крышки фрагмента ТТ, перевернутого вниз в виде полости был собран еще один тождественный измерительный генератор, идентичный первому и также покрытый изолирующим составом и заключенный в изолирующий медный кожух. Условия

завателя как целого с помощью фрагмента ТТ, в котором предварительно была проведена калибровка емкостного датчика. На внешней поверхности крышки фрагмента ТТ, перевернутого вниз в виде полости был собран еще один тождественный измерительный генератор, идентичный первому и также покрытый изолирующим составом и заключенный в изолирующий медный кожух. Условия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

теплообмена на поверхности второго измерительного генератора на крышке фрагмента ТТ были тождественными теплообмену первого измерительного генератора в вихревом проточном калориметре, рисунок 6. Внутри фрагмента ТТ были размещены все необходимые измерительные капилляры для определения толщины слоя калибровочной жидкости [15–16].

Температура проточной воды во внутренней полости и в самом кожухе была 298 ± 0.03 К.

В качестве опорного генератора был ис-

пользован штатный опорный генератор, размещенный на заполненной сухим воздухом опорной ТТ, изображенной на рисунке 6. По результатам измерений разностей частот сигналов второго измерительного генератора и первого опорного генератора были составлены массивы экспериментальных данных разностной частоты и толщины слоя калибровочной жидкости на поверхности измерительного емкостного датчика внутри полости фрагмента ТТ для трех жидкостей. Результаты калибровки второго измерительного генератора представлены на рисунке 7.

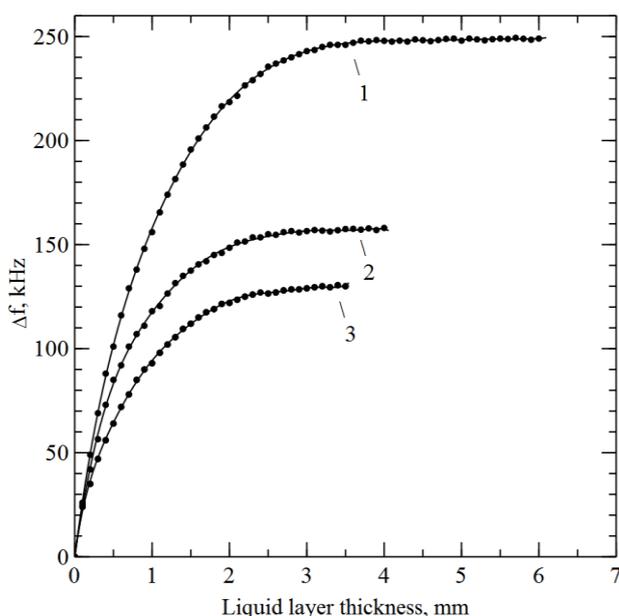


Рисунок 7 – Градуировочные кривые разностей частот измерительного и опорного высокочастотных генераторов в зависимости от толщины слоя рабочих жидкостей: 1 – вода H_2O ; 2 – этиловый спирт C_2H_5OH ; 3 – диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$

Погрешности определения разностей частот меньше 0.2 kHz, погрешности определения толщины слоя калибровочной жидкости 0.01 mm.

Градуировочные кривые разностей частот измерительного и опорного генераторов выходят на насыщение, в случае воды это ~ 248 кГц, этилового спирта ~ 157 кГц, диэтилового эфира ~ 130 кГц. Переход в режим насыщения при измерениях разностей частот связан с тем, что толщина калибровочной жидкости начинает превышать глубину проникновения электрического поля емкостного датчика, что является его важным конструктивным параметром. Величины этих частот насыщения при использовании различных рабочих жидкостей определяется диэлектрической проницаемостью жидкостей $\epsilon_{H_2O} = 81$; $\epsilon_{C_2H_5OH} = 26.8$; $\epsilon_{C_4H_{10}O} = 4.3$, $T = 298$ К.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

Чувствительность нашей аппаратуры максимальна в случае применения воды, $(d\Delta f/dh) \sim 160$ kHz/mm, меньше в случае применения этилового спирта $(d\Delta f/dh) \sim 118$ kHz/mm, и еще меньше в случае применения диэтилового эфира $(d\Delta f/dh) \sim 100$ kHz/mm.

Полиномиальное уравнение, описывающее изменение разности частот Δf измерительного и опорного генераторов в зависимости от толщины слоя воды на измеряющей поверхности емкостного датчика может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta f = & -0.0025103 \cdot h^9 + 0.0760819 \cdot h^8 \\ & - 0.9928788 \cdot h^7 + 7.3051863 \cdot h^6 \\ & - 33.2857468 \cdot h^5 + 97.2342453 \cdot h^4 \\ & - 185.5335891 \cdot h^3 + 250.6751833 \cdot h^2 \\ & - 293.8009809 \cdot h + 0.2049658. \end{aligned} \quad (4)$$

Размерности Δf приведены в kHz, h в

мм, стандартное отклонение $\sigma = 0.5177921$, $R^2 = 0.9995247$.

Полиномиальное уравнение, описывающее изменение разности частот Δf измерительного и опорного генераторов в зависимости от толщины слоя этилового спирта на измеряющей поверхности емкостного датчика может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta f = & -1451933 \cdot h^9 + 2.6374625 \cdot h^8 \\ & - 19.8016726 \cdot h^7 + 78.6063803 \cdot h^6 \\ & - 172.7376236 \cdot h^5 + 188.4840143 \cdot h^4 \\ & - 24.9711599 \cdot h^3 + 183.4739213 \cdot h^2 \\ & - 248.4380688 \cdot h + 0.2045959. \end{aligned} \quad (5)$$

Размерности Δf приведены в kHz, h в мм, стандартное отклонение $\sigma = 0.504563$, $R^2 = 0.999852$.

Полиномиальное уравнение, описывающее изменение разности частот Δf измерительного и опорного генераторов в зависимости от толщины слоя диэтилового эфира на измеряющей поверхности емкостного датчика может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta f = & -0.7788106 \cdot h^9 + 12.9161615 \cdot h^8 \\ & - 90.3403523 \cdot h^7 + 347.1385857 \cdot h^6 \\ & - 801.059099 \cdot h^5 + 1142.7857879 \cdot h^4 \\ & - 1008.542371 \cdot h^3 + 562.9248708 \cdot h^2 \\ & - 258.5727559 \cdot h + 0.2026473. \end{aligned} \quad (6)$$

Размерности Δf приведены в kHz, h в мм, стандартное отклонение $\sigma = 0.670613$, $R^2 = 0.9988017$.

4. ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

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 всегда меньше частоты опорного генератора на небольшую величину 0.2 kHz. 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 $1 \cdot 10^{-3}$ К.

Программа, управляющая работой емкостного преобразователя, имеет два режима работы: «контроль» и «измерение». В режиме «контроль» производится циклический опрос всех датчиков, включая термопары, термисторы, емкостные датчики, обрабатываются

результаты измерений и выводятся на экран дисплея.

В этом режиме уточняются такие параметры управляющей программы как длительность цикла опроса датчиков, времена измерений цифровых вольтметров, осциллографа, частотомера и т.д. После выхода испарителя ТТ и вихревого проточного калориметра на стационарные изотермические состояния программа переключается на режим «измерение». В этом режиме проводятся измерения разности частот опорного генератора и уменьшившейся частоты измерительного генератора, температуры термисторов и термопар, теплопередающих характеристик ТТ, обрабатываются результаты измерений, вычисляются среднее, максимальное и минимальное значение толщины и температуры пленки и выводятся на экран дисплея. При расчете толщины и температуры пленки диэтилового эфира используются калибровочные полиномиальные уравнения (6) и приведенное в [23–26], погрешность собственно вычислений не превышает 0.1 %. Полученные массивы экспериментальных данных сохраняются, и формируется библиотека измерений.

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 0.2 kHz при проведении измерений. Этот дрейф определяет наименьшее значение изменения емкости $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ pF, которое может измерить наша аппаратура.

Частотные зависимости диэлектрической проницаемости диэтилового эфира малы в наших измерениях, тангенс угла диэлектрических потерь при частотах ~ 30 MHz не более 10^{-2} [17].

Результаты измерений усредненных во времени значений толщины слоя диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель приведены на рисунке 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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

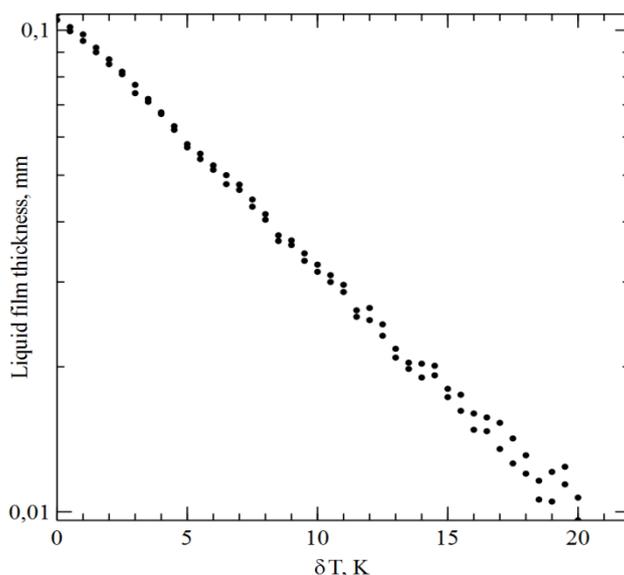


Рисунок 8 – Зависимость усредненных значений толщины пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации от величины перегрева испарителя ТТ относительно температуры кипения диэтилового эфира $\delta T = T_B - T$, К, в полулогарифмической системе координат

Необходимость усреднения во времени получаемых опытным путем мгновенных значений толщины пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации возникает в связи с тем, что течение пара внутри парового канала ТТ носит явно выраженный прецессирующий струйный характер. В капиллярно-пористом испарителе на всю его толщину симметрично относительно продольной оси ТТ выполнены 4 инжекторных канала, см. рисунок 1. Каналы расположены на окружности, находящейся внутри критического диаметра сопла парового канала ТТ, рисунок 1, и наклонены в тангенциальном направлении против часовой стрелки под углом 25° . Диаметры каналов увеличиваются и равны: 1 мм, 1.1 мм, 1.2 мм и 1.3 мм. Испарение диэтилового эфира в этих наклонных капиллярных каналах образует устойчивое струйное течение над поверхностью испарителя и закручивание всего потока пара в паровом канале ТТ.

Кроме того, различие диаметров инжекторных каналов ведет к прецессированию струйного течения пара (рисунок 9) и образованию вращающегося парового вихря винтовой формы, и это прецессирование проявляется в возникновении пульсирующего вращательного течения пленки жидкости на поверхности конденсации ТТ.

Расчет скорости течения пара был проведен с помощью программы CFD Design 10.0, для учета турбулентности применена улучшенная модель $k-\epsilon$ [27]. Вышеупомянутая мо-

дель благодаря более полному описанию скорости диссипации турбулентности обеспечивает лучшую точность расчета турбулентной вязкости по сравнению со стандартной $k-\epsilon$ моделью. Это оказывается существенным при моделировании сложных закрученных турбулентных течений и течений с большой кривизной линий тока, подобных существующим внутри выполненного в виде сопла, близкого к соплу Лавалю парового канала коротких ТТ.

Из-за наличия относительного движения фаз пленка жидкости на поверхности конденсации ТТ вовлекается во вращательное движение за счет касательного напряжения, существующего между внешней поверхностью пленки и закрученным потоком конденсирующегося пара. Затухающее прецессирование скорости струйного парового потока и связанная с прецессированием неоднородность конденсации приводят к возникновению на поверхности пленки дополнительных касательных и нормальных напряжений и как следствие к образованию неоднородности (гребня) толщины пленки. Частота вращения этой неоднородности толщины и температуры пленки диэтилового эфира не превышает $(10 \div 11)$ Hz и была надежно зафиксирована нашим емкостным преобразователем. Вращение неоднородности на поверхности пленки фиксируется (воспринимается) емкостным преобразователем как пульсации толщины пленки, причем частота пульсаций увеличивается при увеличении перегрева испарителя ТТ.

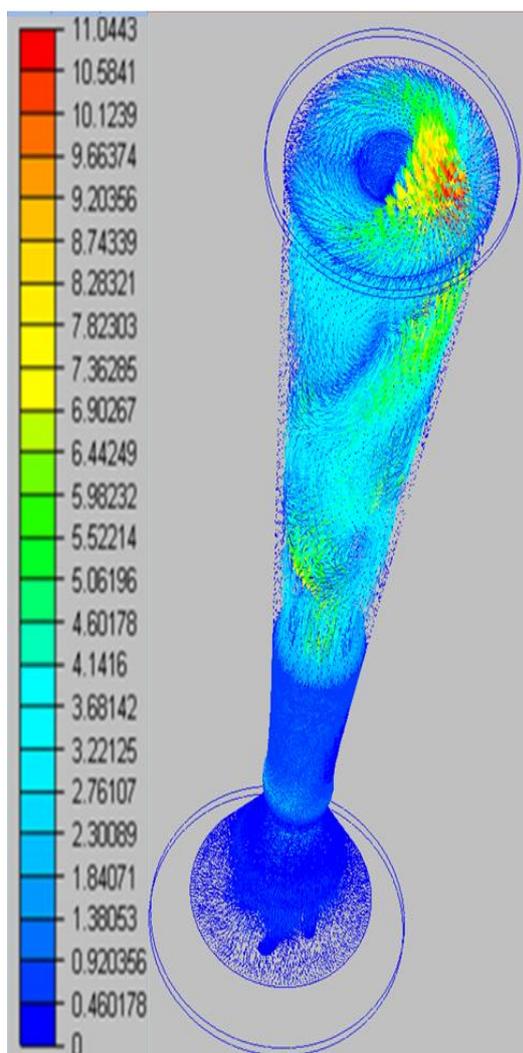


Рисунок 9 – Струйное течение над наклонными инжекторными каналами с увеличивающимися диаметрами, выполненными в капиллярно-пористом испарителе, приводит к возникновению закрутки и прецессированию скорости потока пара диэтилового эфира в паровом канале коротких ТТ. Скорость течения приведена в м/с

Толщина, температура и скорость течения пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации неравномерны, как за счет струйного характера течения пара и неоднородности конденсации, так и за счет прецессирования этих струй в паровом канале ТТ, что подтверждается расчетами и проведенными с помощью емкостного преобразователя измерениями. Результаты расчетов тангенциальной компоненты скорости течения пленки, выполненные с помощью программы CFD Design 10.0, представлены на рисунке 10.

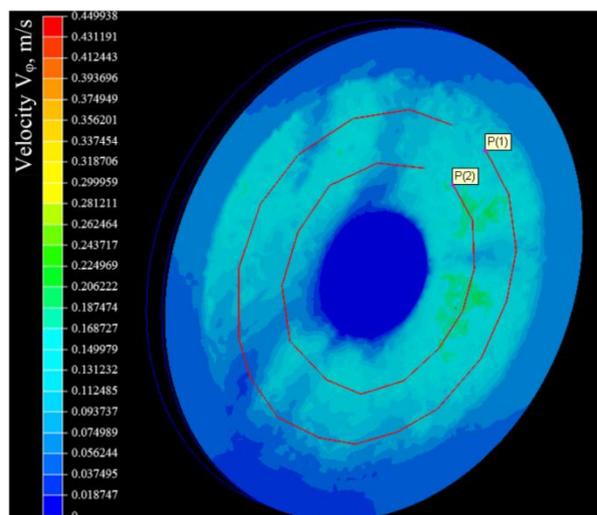


Рисунок 10 – Расчетные значения поля тангенциальной компоненты скорости течения V_{φ} пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ

Выделенные цветовой индикацией в радиальном направлении узкие области пониженных значений скорости разделяют поле течения на секторы, обусловленные закрученным струйным течением пара вблизи поверхности конденсации ТТ.

В правой части рисунка между двумя контурными линиями цветовой индикацией выделена большая особенность скорости, обусловленная прецессированием струйного течения пара. Внешняя и внутренняя контурные линии P(1) и P(2) проведены таким образом, что измерительный емкостный датчик расположен между ними в правой части рисунка, а микротермистор в левой части.

На рисунках 11 и 12 приведены расчетные значения тангенциальной компоненты скорости V_{φ} пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации и температуры пленки вдоль контурных линий P(1) и P(2) из рисунка 10.

Результаты расчетов, представленные на рисунках 11 и 12, показывают явно выраженное пульсирующее изменение, как значений тангенциальной компоненты скорости течения V_{φ} пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации ТТ, так и температуры пленки вдоль контурных линий P(1) и P(2).

На рисунках 13 и 14 приведены осциллограммы изменения толщины (емкости) и температуры пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ, полученные с помощью емкостного преобразователя и микротермистора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

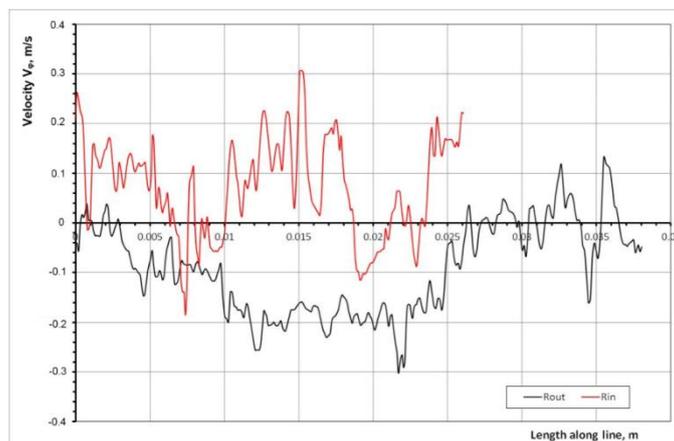


Рисунок 11 – Расчетные значения тангенциальной компоненты скорости V_{φ} пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации вдоль контурных линий P(1) и P(2) из рисунка 10. Максимальное значение величины пульсаций скорости достигает значения 0.3 m/s

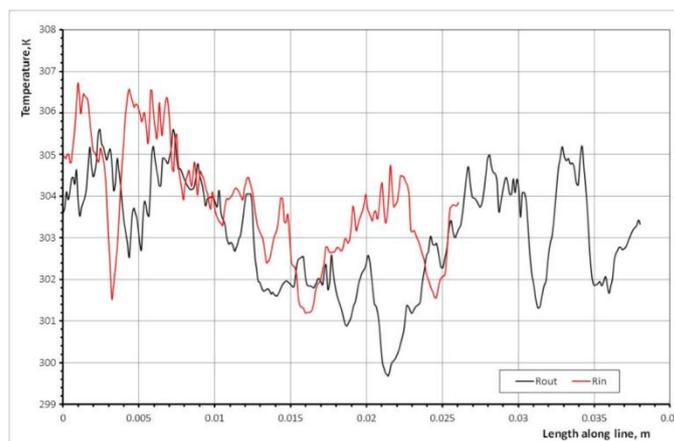


Рисунок 12 – Расчетные значения пульсаций температуры пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации вдоль контурных линий P(1) и P(2) из рисунка 10. Величина пульсаций температуры достигает 6 К

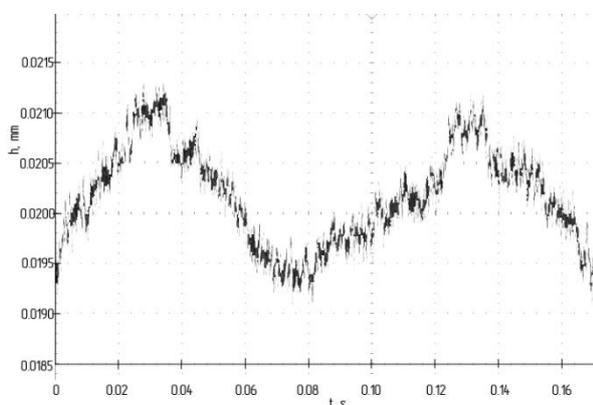


Рисунок 13 – Осциллограммы пульсаций толщины пленки диэтилового эфира на поверхности измерительного емкостного датчика, совпадающей с поверхностью конденсации ТТ

Хорошо видна периодическая особенность (гребень) на поверхности пленки, формируемая прецессирующим струйным течением пара и фиксируемая емкостным преобразователем как пульсация толщины пленки. Это доказывает наличие прецессирующего закрученного течения в паровом канале ТТ, приводящего к периодической неравномерности конденсации пара и к возникновению пульсирующего вращательного движения пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации ТТ. Характер особенности (гребня) сложен, толщина собственно гребня достигает ~ 0.0005 мм, длительность по времени ~ 0.013 s. Амплитуда пульсации толщины пленки достигает 0.0023 мм.

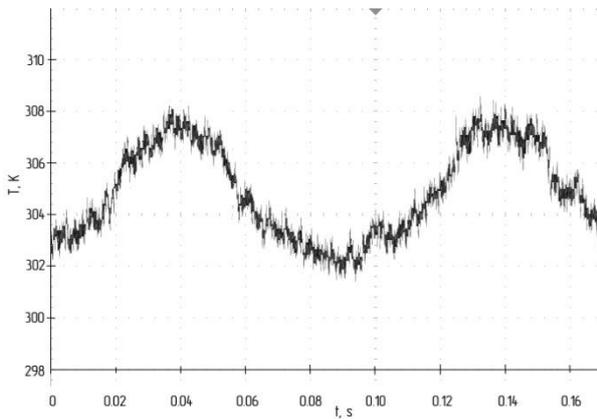


Рисунок 14 – Осциллограмма пульсаций температуры пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ

Изменение температуры пленки периодическое и сглаженное, длительность периодов пульсаций температуры совпадает с длительностью периодов пульсаций толщины пленки, и это дополнительно подтверждает вращательный характер течения пленки. Полная амплитуда пульсаций температуры пленки на поверхности конденсации ТТ достигает 5.12 K, и можно утверждать, что в паровом канале ТТ имеет место прецессирующее струйное течение и температура струй пара различна.

Обращает на себя внимание схожесть осциллограмм пульсаций толщины пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации, приведенная на рисунке 13, и осциллограммы пульсаций температуры этой пленки, полученной с помощью микротермистора, что может быть связано с периодичностью процесса конденсации. Частоты, определенные по пульсациям толщины и температуры пленки одинаковы, и равны $f_{\text{puls}} = 10.34 \pm 0.03 \text{ Hz}$.

Можно отметить, что проведенная оценка среднего значения тангенциальной компоненты скорости течения пленки над поверхностью емкостного датчика, исходя из экспериментального значения частоты пульсаций $f_{\text{puls}} \sim 10.34 \text{ Hz}$, близка к расчетным значениям, представленным на рисунках 10 и 11:

$$V_{\phi} = \omega r = 2\pi f_{\text{puls}} r \sim 2\pi \cdot 10.34 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} \approx 0.325 \text{ м/с}, \quad (7)$$

где ω – круговая частота пульсаций, Hz, r – средний радиус поверхности конденсации, м.

Для того, чтобы оценить влияние закрученного прецессирующего струйного потока пара в паровом канале коротких ТТ на вращательное течение пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации, была изготовлена аналогичная ТТ с тождественным паровым ка-

налом и тождественным капиллярно-пористым испарителем но без наклонных инжекторных капиллярных каналов. Результаты измерений толщины и температуры пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации в такой ТТ представлены на рисунке 15 и рисунке 16.

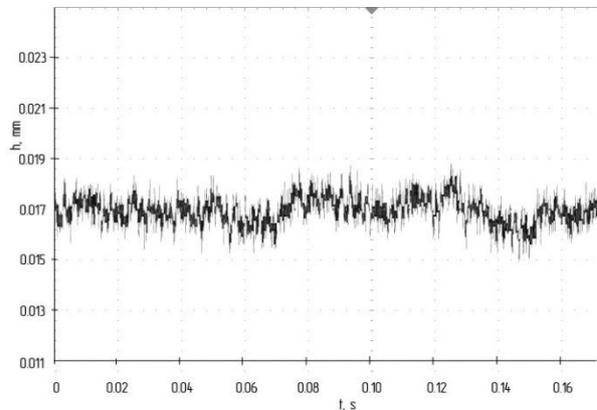


Рисунок 15 – Осциллограмма толщины пленки диэтилового эфира на измерительной поверхности емкостного датчика, совпадающего с поверхностью конденсации в короткой ТТ с испарителем без наклонных инжекторных капиллярных каналов и без закрутки и прецессирования потока пара в паровом канале. Вращательных течений на поверхности конденсации внутри ТТ нет. Величина пульсаций толщины пленки не превышает 0.001 mm

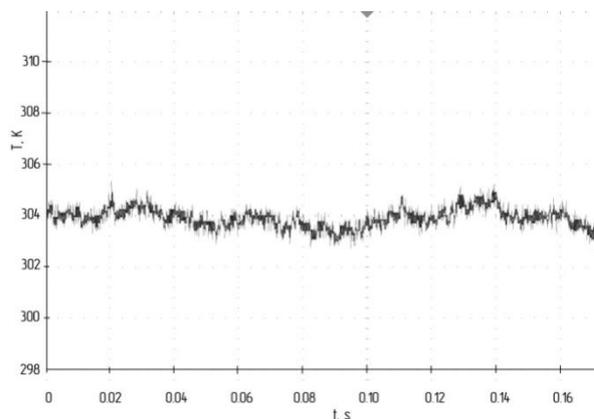


Рисунок 16 – Осциллограмма температуры пленки диэтилового эфира на измерительной поверхности емкостного датчика, совпадающего с поверхностью конденсации в короткой ТТ с испарителем без наклонных инжекторных капиллярных каналов и без закрутки и прецессирования потока пара в паровом канале. Величина пульсаций температуры пленки не превышает 1 K.

Явно выраженных периодических вращательных течений на поверхности конденсации внутри ТТ нет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КОНДЕНСАТА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Все измерения толщины пленки конденсирующегося диэтилового эфира были проведены при вертикальной ориентации ТТ, конденсация происходила на горизонтальной внутренней поверхности верхней крышки и проекция силы тяжести на направление движения пленки равна нулю. Движение пленки в нашем случае обусловлено динамическим воздействием движущегося в радиальном и тангенциальном (окружном) направлении вдоль внешней поверхности пленки потока конденсирующегося пара. Давление пара в первом приближении можно считать постоянным, и движение пленки вызвано только радиальным и тангенциальными касательными напряжениями, действующими на внешнюю поверхность пленки.

Толщина пленки постоянна при времени усреднения более 0.1 с при заданном перегреве испарителя ТТ за счет наличия стационарного процесса перехода (всасывания) жидкой фазы диэтилового эфира в капиллярно-пористую вставку, расположенную по периметру верхней крышки ТТ, рисунок 1, и возврата жидкости в испаритель. Полученные результаты позволяют определить истинную толщину и температуру пленки на поверхности конденсации внутри ТТ.

Дальнейшие результаты и подробный анализ течения пленки на поверхности конденсации внутри низкотемпературных ТТ будут представлены в следующих публикациях.

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 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 определить функциональную зависимость разности частот от толщины слоя калибровочной жидкости.

4. Наклонные инжекторные капиллярные каналы с увеличивающимися диаметрами 1 мм, 1.1 мм, 1.2 мм и 1.3 мм образуют устойчивое струйное течение над поверхностью испарителя и закручивание всего потока пара в паровом канале ТТ. Кроме того, различие диаметров

инжекторных каналов приводит к прецессированию струйного течения пара и образованию вращающегося вихря винтовой формы в паровом канале, и это прецессирование проявляется в возникновении пульсирующего вращательного течения пленки жидкости на поверхности конденсации ТТ.

5. На поверхности конденсации ТТ возникает периодическое вращательное течение пленки диэтилового эфира, обусловленное струйным прецессирующим течением пара в паровом канале коротких ТТ. Частота вращательных пульсаций 10.34 ± 0.03 Hz.

6. Толщина пленки конденсата рабочей жидкости в коротких низкотемпературных ТТ при увеличении перегрева испарителя резко уменьшается. Получена нелинейная зависимость толщины пленки жидкого конденсата от перегрева испарителя ТТ, абсолютная погрешность измерений толщины не более $2 \cdot 10^{-3}$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоссель, Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 288 с.
2. Фореит, И. Емкостные датчики неэлектрических величин; перевод с чешского. – М. : Энергия, 1966. – 160 с.
3. Роговая, А. Измерение толщины и профилей жидкостной пленки / А. Роговая, В. М. Олевский, Н. С. Ринова // Приборы и техника эксперимента. – 1968. – № 1. – С. 189–192.
4. Ozgu, M. R. A capacitance method for measurement the film thickness in two-phase flow / M. R. Ozgu, J. C. Chen, N. Eberhardt // Review of Scientific Instruments. – 1973. – Vol. 44. – P. 1714–1716.
5. Klausner, J. F. Development of a film thickness probe using capacitance for asymmetrical two-phase flow with heat addition / J. F. Klausner, L. Z. Zeng, D. M. Bernhard // Review of Scientific Instruments. – 1992. – Vol. 63. P. 3147–3152.
6. Кротов, С. В. Емкостный измеритель локальной толщины пленки жидкости / С. В. Кротов, А. Д. Назаров, А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, А. Ф. Серов, В. Ю. Чехович // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 1. – С. 149–152.
7. Алексеенко, С. В. Течение пленки криогенной жидкости по вертикальной поверхности / С. В. Алексеенко, А. Д. Назаров, А. Н. Павленко, А. Ф. Серов, В. Ю. Чехович // Теплофизика и аэромеханика. – 1997. – Т. 4, № 3. – С. 307–317.
8. Павленко, А. Н. Динамика течения интенсивно испаряющейся волновой пленки жидкости / А. Н. Павленко, В. В. Лель, А. Ф. Серов, А. Д. Назаров // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 3. – С. 107–115.
9. Алексеенко, С. В. Волновое течение пленок жидкости / С. В. Алексеенко, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев. – Новосибирск : ВО «Наука», 1992. – 256 с.

10. Thorncroft, G. E. A Capacitance sensor for two-phase liquid film thickness measurements in a square duct / G. E. Thorncroft, J. F. Klausner // *Journal of Fluids Engineering*. – 1997. – Vol. 119, № 1. – P. 164–169.
 11. Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation // *The Royal Society of Chemistry. Lab Chip*. – 2004. – Vol. 4. – P. 473–480.
 12. Tibirićá, C. B. Film thickness measurement techniques applied to micro-scale two-phase flow systems / C. B. Tibirićá, F. J. Nascimento, G. Ribatski // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – Vol. 34. – P. 463–473.
 13. Патент на полезную модель № 152108. Емкостный датчик определения толщины слоя жидкости / Серяков А. В. – Оpubл. 27.06.2015, Бюл. № 18/2015.
 14. Seryakov, A. V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes / A. V. Seryakov // *International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application*. – 2014. – Vol. 2, № 2. – P. 40–49.
 15. Seryakov, A. V. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes / A. V. Seryakov, V. I. Ananiev, A. V. Orlov // *Proceedings of the IX Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources*. Minsk, Belarus, 7-10 September. – 2015. – Vol. 2. – P. 168–176.
 16. Seryakov, A. V. Condensation research in the short low-temperature range heat pipes / A. V. Seryakov, V. I. Ananiev // *Proceedings of the VIII International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, September 15-18, Begell House Inc. – 2015. – P. 693–696.
 17. Ахадов, Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник ГСССД / Я. Ю. Ахадов // М. : Издательство Стандартов, 1972 – 412 с.
 18. Кэй, Д. Таблицы физических и химических постоянных / Д. Кэй, Т. Лэби. – М. : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1962. – 247 с.
 19. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.
 20. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин; под общ. ред. А. А. Потехина, А. И. Ефимова. – СПб. : Химия, 1994. – 432 с.
 21. Fernandes, D. P. 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 / D. P. Fernandes, et al. // *Journal of Physical and Chemistry Reference Data*. – 1997. – Vol. 26. – P. 1125–1166.
 22. Fernandes, D. P. A database for the static dielectric constant of water and steam / D. P. Fernandes, et al. // *Journal of Physical and Chemistry Reference Data*. – 1995. – Vol. 24, № 1. – P. 33–69.
 23. Серяков, А. В. Измерение температуры термисторами / А. В. Серяков // *Вестник СибГАУ*. – 2013. – Вып. 1(47). – С. 167–172.
 24. Серяков, А. В. Повышение точности измерения температуры термисторами / А. В. Серяков // *Датчики и Системы*. – 2013. – № 1. – С. 38–42.
 25. Seryakov, A. V. A new method for temperature measurement using thermistors / A. V. Seryakov // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2013. – Vol. 2, № 7. – P. 444–454.
 26. Seryakov, A. V. A universal method for temperature measurement using thermistors / A. V. Seryakov // *National Journal of Engineering and Technology Research*. Academia Publishing. – 2013. – Vol. 1(1). P. 14–20.
 27. Shih, T. H. A new k - ϵ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flow-model development and validation / T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbier, Z. Yang, J. Zhu // *Computers and Fluids*. – 1995. – Vol. 24, № 3. P. 227–238.
- Серяков А.В.**, старший научный сотрудник ООО «НПП «МЕДГАЗ», Россия, 121471 г. Москва, ул. Можайское шоссе, 29, e-mail: seryakovav@yandex.ru.