

Исследование коротких низкотемпературных тепловых труб. Часть 1. Экспериментальные и численные исследования

Канд. физ.-мат. наук **А. В. СЕРЯКОВ**

seryakovav@yandex.ru

ОАО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике»
173021, Великий Новгород, ул. Нехинская, 55

Представлены результаты исследований коэффициента теплопередачи и вихревых пульсационных течений в паровом канале, выполненном в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, коротких низкотемпературных тепловых труб. В охлаждаемых плоских верхних крышках тепловых труб установлены емкостные датчики конденсации, на которые от внешнего генератора подавали электромагнитные импульсы. При нагревании испарителя тепловой трубы, начиная с некоторого порогового значения тепловой мощности, электромагнитные импульсы оказываются модулированными. Этот факт связывают с возникновением кипения в пористом испарителе и образованием большого количества пара над ним, что приводит к резкому повышению давления над испарителем и прекращению кипения в нем, что проявляется в виде возникновения пульсаций давления в паровом канале. Измерены частоты пульсаций и их зависимость от величины перегрева испарителя. Обнаружено, что частоты пульсаций больше и возникают они при меньших величинах перегрева испарителя в тепловых трубах с паровым каналом, выполненном в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, по сравнению тепловыми трубами со стандартным цилиндрическим паровым каналом при равных габаритных размерах.

Ключевые слова: низкотемпературные тепловые трубы, сопло Лаваля, емкостный датчик конденсации.

Study of short low temperature range heat pipes. Part 1. Experimental and numerical studies

Ph. D. A. V. SERYAKOV

seryakovav@yandex.ru

Special Relay System Design and Engineering Bureau
Nehinskaya Str., 55, Velikiy Novgorod, Russia, 173021

The research results of heat transfer coefficient and pulsation vortex flows in the vapour channel, resembling to Laval nozzle, of short low-temperature range heat pipes are presented. In a cooled top cover of the heat pipes capacitive sensors, which are exposed to electromagnetic pulses from an external generator, are installed. When the heat pipe evaporator is heated electromagnetic pulses became modulated starting from a certain boundary value of the thermal power. It is connected with the beginning of boiling in the evaporator, and the formation of a large amount of vapour that leads to a rapid increase in pressure and termination boiling in the evaporator, and the occurrence of the pressure pulsations in the vapour channel. The frequency of pulsations, with its dependence on the magnitude of the evaporator overheating, are measured. It is shown that the frequency of pulsations are higher and they occur at lower values of overheating of the evaporator in the heat pipes with vapour channel, resembling to Laval nozzle, compared with heat pipes with standard cylindrical vapour channel of the same dimensions.

Keywords: low-temperature range heat pipes, Laval nozzle, capacitive condensation sensor.

Введение

Пульсирующие (или осциллирующие) контурные тепловые трубы-сифоны были изобретены Akachi [1] в 1990 г. При разности температур испарителя и области конденсации, превышающей определенное пороговое значение, в трубах-сифонах начинается интенсивное кипение и испарение рабочей жидкости, приводящее к образованию перемежающихся пузырей пара и жидкостных пробок конденсата, которые спонтанно начинают колебаться туда и обратно [2, 3]. Амплитуда колебаний большая и жидкостные пробки проникают как в испаритель, так и в область конденсации контурной трубы-сифона. Тепловая энергия внутри тепловой трубы (ТТ) переносится не только с помощью скрытой теплоты фазового перехода жидкость-пар-жидкость, как в других типах ТТ, но и путем кондуктивной теплопередачи горячих колеблющихся жидкостных пробок к холодным стенкам области конденсации ТТ. Это явление обуславливает повышение коэффициента теплопередачи контурных сифонных ТТ по сравнению с другими типами ТТ.

В коротких линейных ТТ с капиллярно-пористой вставкой увеличение коэффициента теплопередачи осуществляют с помощью придания внутреннему паровому каналу формы сопла, близкого к соплу Лаваля. Форму этого выполненного в виде сопла парового канала задает внутренняя капиллярно-пористая вставка.

При аксиальном направлении теплового потока на входе в ТТ, характерном для коротких ТТ, появляется возможность использования струйного парового сопла, аналогичного соплу Лаваля, и вытянутого вдоль всей длины ТТ. Это увеличивает скорость течения, частоты пульсаций двухфазного потока пара и коэффициент теплопередачи ТТ.

Пульсации течения пара в коротких линейных ТТ с капиллярно-пористой вставкой представляют собой

более сложное явление, связанное с кипением рабочей жидкости в капиллярно-пористом испарителе и, по-видимому, данная статья является первой публикацией, посвященной этому вопросу.

Текущая паровая среда с микрокаплями конденсата является нелинейным объектом, течение которого сопровождается внутренними процессами межфазного тепло-массообмена и диссипации энергии [4]. Восстановление статического давления пересыщенного парового потока в области конденсации тепловой трубы связано с торможением потока, возникновением сильной и нестационарной завихренности вблизи поверхности конденсации и возвратного течения пара. Процессы вихреобразования и пульсаций плотности и давления в паровом канале тепловых труб в зависимости от тепловой нагрузки определяют интенсивность конденсации и представляют большой интерес. Для экспериментального исследования этих процессов были изготовлены тепловые трубы из нержавеющей стали, с плоским капиллярно-пористым испарителем, с паровым каналом, выполненным в виде газодинамического конфузурно-диффузорного сопла, близкого к соплу Лаваля и окруженного слоем капиллярно-пористой вставки вдоль всей длины ТТ [5–7] (рис. 1).

Материалы и методы

В качестве рабочей жидкости ТТ выбран диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$, имеющий температуру кипения при атмосферном давлении $T_B = 308,55$ К ($35,4$ °С), температуру замерзания $T_F = 156,95$ К ($-116,2$ °С), и критические параметры $T_C = 466,55$ К ($193,4$ °С), $P_C = 3,61$ МПа. Успешный опыт длительного применения диэтилового эфира в качестве рабочей жидкости для камер Вильсона, при длительном нахождении жидкой фазы при температуре $413,15$ К (140 °С), показывает тепловую резистивность и возможность применения в качестве рабочей жидкости для ТТ.

Измерительная поверхность емкостных датчиков совпадает с внутренней поверхностью плоской верхней крышки.

Капиллярно-пористый испаритель 7 выполнен из 43 круговых слоев тонкой сетки из нержавеющей стали по ГОСТ 3826–82, толщиной 0,07 мм каждый, с размером ячеек 0,04 мм, суммарной толщиной 3 мм, все слои точно приварены к плоской нижней крышке 5.

Внешние диаметры круговых слоев последовательно уменьшаются таким образом, что боковая поверхность испарителя в сборе образует острый конус с полным углом при вершине, равным 41° , совпадающим с углом конфузурного канала капиллярно-пористой вставки.

Испаритель дополнительно оснащен инжекторными паровыми каналами $\varnothing 1$ мм, направленными под определенным углом к продольной оси ТТ и создающими закрутку потока пара при малых тепловых нагрузках.

Капиллярно-пористая вставка 4 сформирована на специальной профилированной оправке из слоев тонкой сетки из нержавеющей стали по ГОСТ 3826–82. Толщина каждого слоя 0,07 мм, размер ячеек 0,04 мм, суммарная толщина вставки 1,5 мм на краях и 7,5 мм в области критического диаметра внутреннего сопла. Все слои вставки в радиальном направлении скрепле-

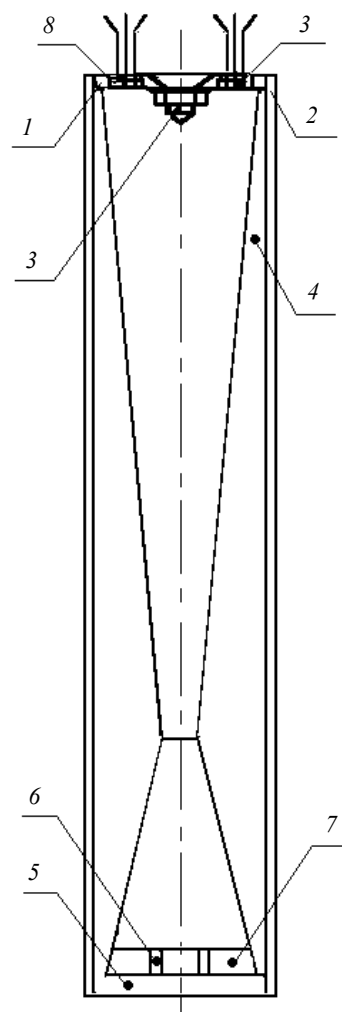


Рис. 1. Схема тепловой трубы: 1 — верхняя крышка; 2 — цилиндрический корпус ТТ; 3 — конический турбулизатор; 4 — капиллярно-пористая вставка; 5 — нижняя крышка; 6 — инжекторные каналы; 7 — капиллярно-пористый испаритель; 8, 9 — емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину слоя жидкого конденсата

ны и прошиты тонкой проволокой диаметром 0,05 мм, стежками длиной 5–7 мм вдоль образующей вставки. Восемь линий стежков проволоки, скрепляющих в радиальном направлении слои сетки, в плане повернуты друг относительно друга на 45° и образуют жесткую конструкцию капиллярно-пористой вставки с внутренним паровым каналом, выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лаваля.

Многослойный испаритель с конической боковой поверхностью плотно вставлен в жесткую капиллярно-пористую вставку, и приварен к ней точечной сваркой. После охлаждения при температуре кипения жидкого азота $77,4$ К ($-195,75$ °С) собранная капиллярно-пористая вставка вместе с испарителем на нижней плоской крышке 5 плотно вставлена в цилиндрический корпус 2. Пористость вставки и испарителя 72%, и вместе они образуют единую гидравлическую систему доставки рабочей жидкости в испаритель при работе ТТ.

Длина ТТ 100 мм, диаметр 20 мм, максимальный диаметр парового сопла 16 мм, критический диаметр сопла 4 мм, длина конфузурного участка сопла 13 мм, пол-

ный угол конфузорного участка 41° , длина диффузорного участка сопла 81 мм, полный угол диффузорного участка $8,5^\circ$, длина цилиндрического участка в критическом сечении сопла 1 мм.

Вместе со сложными ТТ с паровым каналом, выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, были изготовлены такие же ТТ с капиллярно-пористыми вставками и со стандартным цилиндрическим паровым каналом. Внешний диаметр ТТ 20 мм, толщина испарителя 3 мм, толщина вставки 3 мм.

Результаты и обсуждение

Зоны конденсации ТТ снабжены измерительными термопарами медь-константан, и помещены в вихревой

проточный калориметр (рис. 2). Для точного измерения тепловой мощности и интенсификации съема тепла ТТ, струйный поток входящей в калориметр воды закручивают, величины скорости течения и завихренности с помощью воздушных пузырьков фиксируют. Испаритель ТТ, также снабженный термопарами медь-константан, с помощью резистивного нагревателя и регулятора температуры ВРТ-3 подогревают и поддерживают при температуре, превышающей температуру кипения диэтилового эфира $35,4^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении на величину перегрева δT . Температура нагревателя стабилизирована, и величину перегрева испарителя ТТ устанавливают в диапазоне $\delta T = 0 \div 15\text{ K}$, при этом тепловая мощность единичной ТТ не превышает 150 Вт.

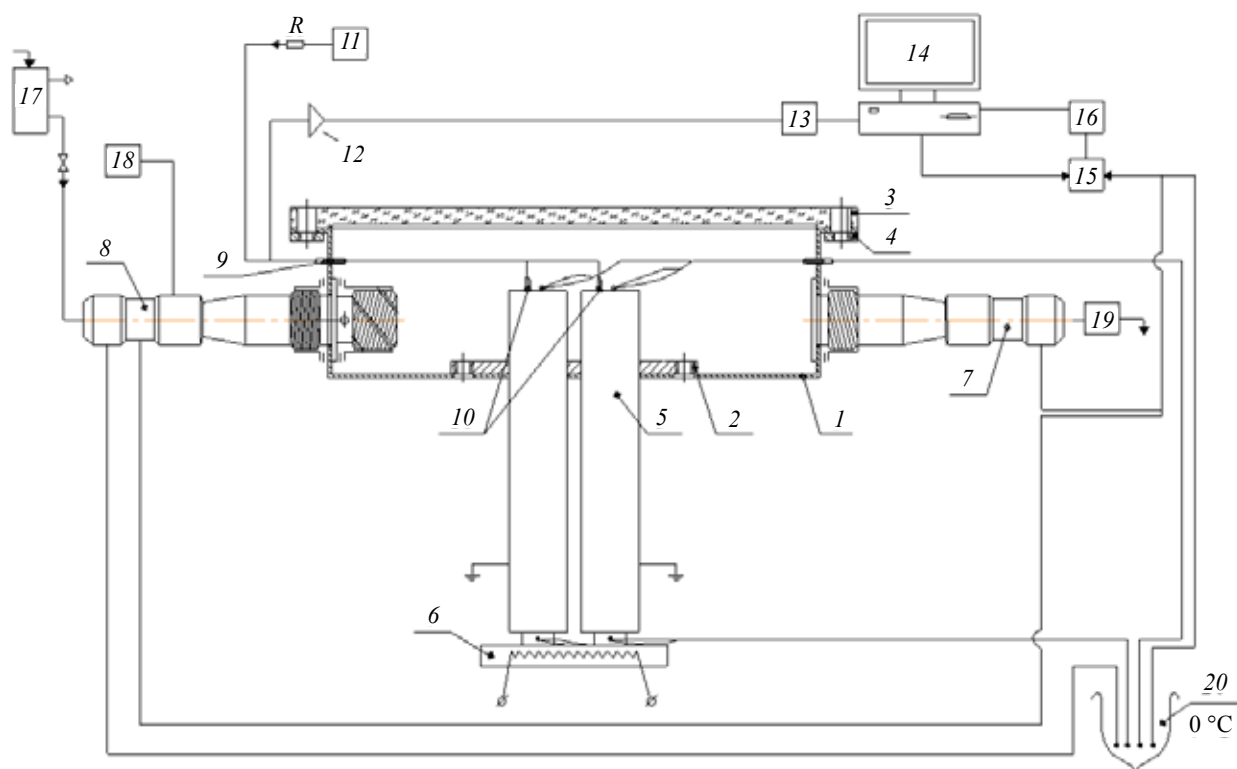


Рис. 2. Схема вихревого проточного калориметра: 1 — вихревой проточный калориметр; 2 — фланец крепления тепловых труб; 3 — стеклянная крышка; 4 — крепление крышки; 5 — тепловые трубы; 6 — резистивный нагреватель; 7 — выходной штуцер для воды; 8 — входной штуцер для воды; 9 — уплотнение измерительных проводов; 10 — конденсаторные датчики измерения толщины слоя конденсата; 11 — генератор импульсов Г5-56; 12 — усилитель; 13 — осциллограф АКПП-4116/2; 14 — компьютер; 15 — коммутатор; 16 — вольтметр В7-34А; 17 — сосуд постоянного напора воды; 18 — генератор пузырьков воздуха; 19 — расходомер воды; 20 — сосуд Дьюара

Измерение коэффициента теплопередачи тепловых труб

Были проведены измерения коэффициента теплопередачи ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, и со стандартным цилиндрическим паровым каналом с помощью вихревого проточного калориметра, рис. 2. Коэффициент теплопередачи ТТ [8], определяется по формуле

$$K_{HP} = \frac{E}{F(T_{ev} - T_{cond})}, \quad (1)$$

Температуру поверхности испарителя и поверхности конденсации ТТ измеряли с помощью дифференциальных термопар медь-константан, тепловую

мощность, передаваемую в калориметр зонами конденсации ТТ, определяли по формуле

$$E = G \left(C_{H_2O} + \frac{C_K}{c_{H_2O} V_0} \right) \cdot [T_K(\tau) - T_{K0}(\tau)]. \quad (2)$$

Температуру воды на входе в калориметр, разность температур (величину подогрева) проточной воды на входе и выходе из калориметра измеряли также дифференциальными термопарами медь-константан и компаратором Р3003 и цифровым вольтметром В7-34А. Расход воды измеряли ультразвуковым расходомером US 800–10. Суммарная погрешность измерения тепловой мощности ТТ с помощью калориметра не превышает 1,7%.

Сравнение коэффициентов теплопередачи ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, со стандартным цилиндрическим каналом показало следующие результаты.

1. Коэффициент теплопередачи коротких линейных ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, достигает значения $(22 \pm 0,5) \cdot 10^4$ Вт/(м²·К); коэффициент теплопередачи ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом достигает значения $(15 \pm 0,5) \cdot 10^4$ Вт/(м²·К).

2. Тепловое сопротивление ТТ [8], определяется по формуле

$$R_{HP} = \frac{(T_{ev} - T_{cond})}{E} \quad (3)$$

Тепловое сопротивление ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, достигает значения $0,026 \pm 0,001$ К/Вт; тепловое сопротивление ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом $0,032 \pm 0,001$ К/Вт, погрешность измерения теплового сопротивления ТТ не превышает 2,5%.

Измерение пульсационных характеристик тепловых труб

Пульсационные характеристики ТТ измерялись следующим образом. Перегрев испарителя ТТ относительно температуры кипения диэтилового эфира δT с помощью резистивного нагревателя δ и регулятора ВРТ-3 увеличивали дискретными шагами на величину 1 К. На электроды емкостных датчиков подавали электрические импульсы генератора Г5-56 с частотой следования $10 \div 100$ кГц и амплитудой 5 В. Начиная с некоторого перегрева δT испарителя ТТ электрические импульсы оказываются модулированными. Измерение частоты модуляции импульсов проводили через схему усиления и фильтрации 12, цифровой осциллограф 13 и компьютер 14 (см. рис. 2). Погрешность измерения частоты модуляции не превышает 3–5 Гц. Осциллограммы возрастания частоты модуляции электрических импульсов в зависимости от тепловой нагрузки на ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, показаны на рис. 3. Перегрев испарителя ТТ $\delta T \sim 5$ К, частота модуляции $f_{mod} \sim 396$ Гц (нижняя осциллограмма); $\delta T \sim 15$ К, $f_{mod} \sim 502$ Гц (верхняя осциллограмма).

На рис. 4 приведены результаты измерений частотных характеристик ТТ в зависимости от перегрева испарителя ТТ.

Первые пульсационные течения в ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, зарегистрированы при перегреве испарителя $\delta T \sim 4$ К, частота пульсаций (частота модуляции электромагнитных импульсов) $f_1 \sim 386$ Гц.

В таблице приведены значения частот пульсаций (частоты модуляции), полученные в ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, f_1 , Гц, и в ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом f_2 , Гц, в зависимости от величины перегрева δT , К, испарителей.

При увеличении перегрева испарителя $\delta T \sim 15$ К частоты пульсаций в паровом канале ТТ возрастают

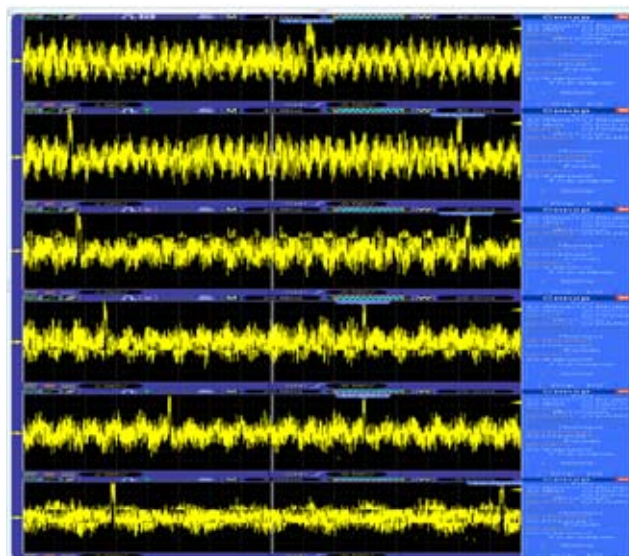


Рис. 3. Осциллограммы возрастания частоты модуляции электрических импульсов в зависимости от тепловой нагрузки на ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю, снизу вверх

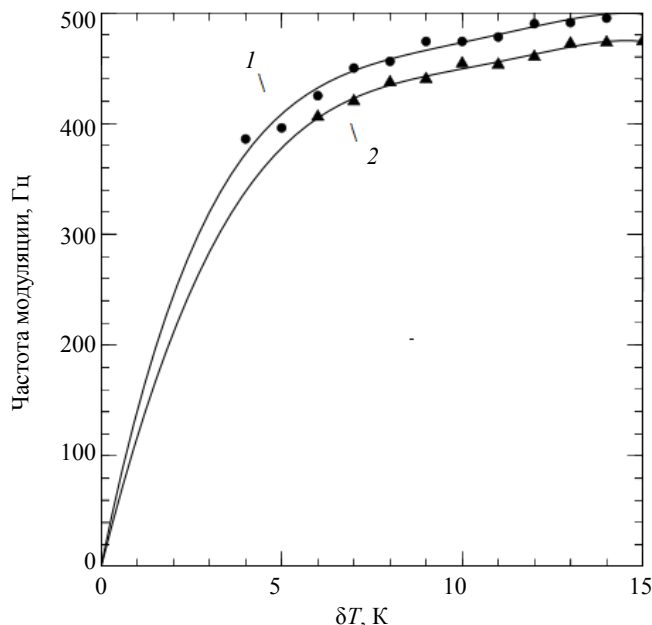


Рис. 4. Экспериментальные значения частот модуляции электрических импульсов в зависимости от перегрева испарителя ТТ: 1 — ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю; 2 — ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом, при равенстве внешнего диаметра ТТ и площади сечения капиллярно-пористых вставок

до ~ 502 Гц, производная зависимости частоты пульсаций от температуры порядка 10,5 Гц/К. При исследовании ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом и при одинаковых габаритных размерах первые пульсационные течения возникают при перегреве испарителя $\delta T \sim 6$ К, частота пульсаций (частота модуляции электромагнитных импульсов) $f_2 \sim 406$ Гц. При увеличении перегрева $\delta T \sim 15$ К частоты пульсаций в цилиндрическом паровом канале увеличиваются до 474 Гц, производная зависимости частоты пульсаций от температуры порядка 7,5 Гц/К. Зона нечувствительности емкостных датчиков в цилиндрическом паровом канале ТТ, определяемая начальным конвективным характером течения

Значения частот пульсаций в зависимости от величины перегрева испарителей

Перегрев испарителя, δT , К	Частота пульсаций f_1 , Гц	Частота пульсаций f_2 , Гц
4,05	386±5	—
5,10	396±5	—
6,03	426±5	406±5
7,15	450±5	420±5
8,00	456±5	437±5
9,07	474±5	440±5
10,03	474±5	454±5
11,00	478±5	453±5
12,10	490±5	460±5
13,06	491±5	472±5
14,02	495±5	473±5
15,12	502±5	474±5

пара, больше чем в паровом канале ТТ в виде сопла, близкого к соплу Лавая. Динамический диапазон пульсаций в паровом канале ТТ в виде сопла, близкого к соплу Лавая, несколько больше по частоте, и равен 386÷502 Гц, по сравнению с диапазоном пульсаций 406÷474 Гц в цилиндрическом паровом канале.

Результаты численного моделирования

Представлены результаты моделирования течения сжимаемой паровой среды внутри парового канала в виде сопла, близкого к соплу Лавая. При большой тепловой мощности, поступающей в ТТ и кипении в сеточном испарителе, в конфузурной части сопла возникает избыток пара, приводящий к росту давления до величины, при которой средняя температура слоев тонкого сеточного испарителя становится меньше температуры кипения рабочей жидкости, и кипение в испарителе прекращается. Избыток пара распространяется по диффузорной части парового канала в охлаждаемую область ТТ и частично конденсируется. В результате конденсации давление в паровом канале снижается, и кипение в тонком испарителе возобновляется. Время роста давления, распространение волны пара в область конденсации ТТ и обратной волны разрежения определяет период пульсаций в паровом канале [6, 9, 10].

Кроме того, торможение потока пересыщенного пара при конденсации приводит к образованию вихрей и возникающие между ними взаимодействия обуславливают пульсационный распад вихрей, рост статического давления и сложные возвратные течения (рис. 5). При всех рабочих параметрах тепловых труб наблюдался пленочный тип конденсации. Толщина пленки конденсата не превышает 1 мм.

Результаты получены с помощью программы CFD Design 10.0, на рисунке отчетливо виден переход от конвективного к пульсационному режиму течения при увеличении перегрева испарителя ТТ относительно температуры кипения эфира на 1; 3; 5; 7 °С.

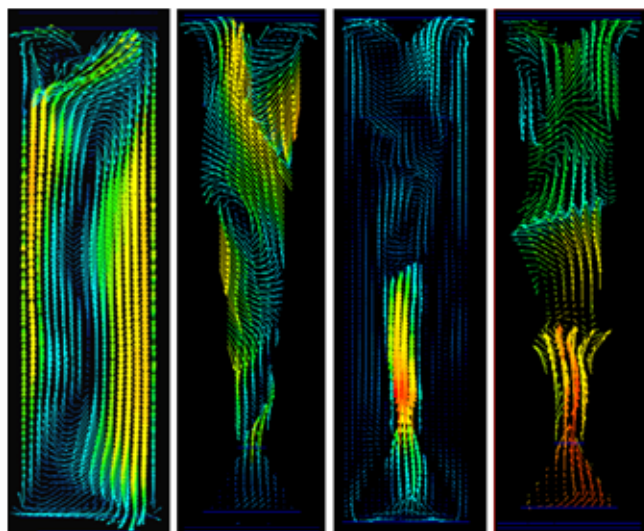


Рис. 5. Расчетные значения пульсаций скорости потока пара в паровом канале ТТ

Максимальное значение скорости течения влажного пара диэтилового эфира, полученное расчетным путем в критическом сечении сопла парового канала с помощью цветовой индикации программы CFD Design 10.0, при возникновении пульсаций достигает величины (100÷110) м/с. Это дает возможность оценить число Рейнольдса парового потока во время пульсаций, определяемое по формуле

$$Re = \frac{\rho_{vp}^{mix} u_{vp} D_c}{\eta_{mix}} \quad (4)$$

Подставляют плотность и динамическую вязкость [11, 12] влажного пара диэтилового эфира $\rho_{vp}^{mix} \sim 1 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, $\eta_{mix} \sim 8 \cdot 10^{-6}$ Па·с, скорость течения $u_{vp} \sim (100 \div 110)$ м/с; критический диаметр парового канала $D_c \sim 4 \cdot 10^{-3}$ м, и получают величину $Re \sim 500-550$, число Прандтля $Pr = 0,77$. Для проведения надежных расчетов давления влажного пара и оценок течений рабочей среды в двухфазном состоянии в ТТ, необходима разработка многоконстантного уравнения состояния вириального типа для диэтилового эфира, аналогичного предложенным в работах [13–15], с применением современных тенденций в аппроксимации термодинамических свойств.

Список условных обозначений:

G — массовый расход воды через вихревой проточный калориметр, кг/с;

C_{H_2O} — удельная теплоемкость проточной воды, Дж/(кг·°С);

ρ_{H_2O} — плотность проточной воды при температуре измерений, кг/м³;

V_0 — вместимость вихревого проточного калориметра, м³;

C_K — теплоемкость вихревого проточного калориметра вместе со всем установленным в ней оборудованием, включая завихритель и датчики температуры, Дж/°С;

$T_{K0}(\tau)$ — средняя температура вихревого калориметра с проточной водой до начала подогрева его тепловыми трубами, К;

$T_k(\tau)$ — средняя температура воды в вихревом проточном калориметре после начала его подогрева тепловыми трубами, К.

E — поступающая в испаритель ТТ тепловая мощность, Вт;

ΔQ — поглощаемая в испарителе тепловая энергия за период времени Δt , Дж;

Δt — единица времени, с;

Список литературы (References)

1. Akachi H. Structure of Heat Pipe. US patent 1990. №4921041.
2. Tong B. Y., Wong T. N., Ooi K. T. Closed-loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*. 2001. vol. 21, No 18, pp. 1845–1862.
3. Naik R., Varadarajan V., Pundarika G. and Narasimha K. R. Experimental Investigation and Performance Evaluation of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 6, No. 2, pp. 267–275.
4. Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., Swirl Flows, Abacus Press, Kent, England. 1984. 588p.
5. Патент №2431101 RF, F 28D 15/00/Способ заполнения тепловых труб. Серяков А. В. Опубликовано 10. 10. 2011. Бюллетень 28. [Patent №2431101 RF, F 28D 15/00/Method of filling of thermal pipes. A. V. Seryakov. 2011. Bulletin 28. (in Russian)]
6. Серяков А. В., Конькин 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. Application of a jet steam nozzle in thermal pipes of the medium temperature range. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta*. 2012. Vol. 1 (41), p. 142–147. (in Russian)]
7. Seryakov A. V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013, vol. 2, No 8, p. 1595–1603.
8. Petersen G. P. An Introduction to Heat Pipes. Modeling, Testing and Applications. New York.: JohnWiley and Sons, Inc. 1994. 356 p.
9. Серяков А. В., Павлов А. А., Михайлов Ю. Е., Белоусов В. К. Пульсационные течения в паровом канале тепловых труб // Решетневские чтения. Материалы XVII Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. 2013. Часть 1. с. 93–96. [Seryakov A. V., Pavlov A. A., Michailov Y. E., Belousov V. K. The pulsation currents in the steam channel of thermal pipes. Materials XVII of the International scientific conference. Krasnoyarsk. 2013. Part 1. p. 93–96. (in Russian)]
10. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of low temperature range heat pipes. *Direct Research Journal of Engineering and Information Technology*. 2014, vol. 2 (1), p. 1–10.
11. Варгафтик Н. Б. //Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М., 1963. 708 с. [Vargaftic N. B. The reference manual on heatphysical properties of gases and liquids. Moscow. 1963. 708 p. (in Russian)]
12. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. И. К. Кикоина. — Атомиздат, 1976. 1008 с. [Kikoin I. K. Tables of physical quantities. Reference manual. 1976. 1008 p. (in Russian)]
13. Сухих А. А., Закопырин М. А., Утенков В. Ф. Экспериментальное исследование плотности бинарных смесей хладагентов R23-HFE 347 тсс и разработка локального многоконстантного уравнения состояния вириального типа // Вестник Международной академии холода. 2009. №1. с. 16–21. [Sukhikh A. A., Zakopyrin M. A., Utenkov V. F. Experimental investigation of density of binary mixtures of refrigerants R23-HFE 347 tss and development of local multi-constant equation of state of virial type. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2009. No 1. p. 16–21. (in Russian)]
14. Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Демина Л. Ю. Единое уравнение состояния R717, учитывающее особенности критической области // Вестник Международной академии холода. 2009. №4. с. 29–32. [Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Demina L. U. A universal equation of state for R717 allowing for features of the critical area. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2009. No 1. p. 29–32. (in Russian)]
15. Сухих А. А., Закопырин М. А., Джуряева Е. В. Экспериментальное исследование плотности бинарных смесей фторэфира HFE347 тсс с хладагентом R218 и разработка многоконстантного уравнения состояния вириального типа // Вестник Международной академии холода. 2010. №1. с. 9–15. [Suhikh A. A., Zakopyrin M. A., Djuraeva E. V. Experimental research of density of binary mixes HFE347mcc with refrigerant R218 and development the multiconstant equation of a condition virial type. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2010. No 1. p. 9–15. (in Russian)]
16. Lee R., Reges J., Almenas K. Size and number density change of droplet populations above front during reflow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1984. v. 27. No 4. p. 573–585.