

## ВИХРЕВЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

А.В. Серяков

*Представлены результаты исследований вихревых пульсационных течений в выполненном в виде сопла, близкого к соплу Лаваля, паровом канале коротких низкотемпературных тепловых труб. В зоне конденсации тепловых труб установлены емкостные датчики, на которые подавали электромагнитные импульсы от внешнего генератора. При нагревании испарителя тепловой трубы начиная с некоторого порогового (граничного) значения тепловой мощности электромагнитные импульсы оказываются модулированными, что связывают с началом кипения в испарителе, образованием большого количества пара и возникновением пульсаций давления в паровом канале. Измерены частоты пульсаций и их зависимость от величины перегрева испарителя.*

*Ключевые слова: короткие тепловые трубы, сопло Лаваля, емкостный датчик конденсации*

Работа представляет собой часть комплексного расчетно-экспериментального исследования интенсификации теплопередающих характеристик тепловых труб (ТТ) низкотемпературного диапазона. 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. Текущая паровая среда с микрокаплями конденсата является нелинейным объектом, течение которого сопровождается внутренними процессами межфазного теплообмена и диссипации энергии [1]. 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 кана-

лом, выполненным в виде газодинамического конфузorno-диффузорного сопла, близкого к соплу Лаваля и окруженного слоем капиллярно-пористой вставки вдоль всей длины ТТ [2-4]. качестве рабочей жидкости ТТ выбран диэтиловый эфир  $C_4H_{10}O$  имеющий температуру кипения при атмосферном давлении  $T_B = 308.55K$  ( $35.4^\circ C$ ), температуру замерзания  $T_F = 156.95K$  ( $-116.2^\circ C$ ) и критические параметры  $T_C = 466.55K$  ( $193.4^\circ C$ ),  $P_C = 3.61MPa$ . Успешный опыт длительного применения диэтилового эфира в качестве рабочей жидкости для камер Вильсона, при длительном нахождении жидкой фазы при температуре  $413.15K$  ( $140^\circ C$ ), показывает тепловую резистивность и возможность применения в качестве рабочей жидкости для ТТ.

Измерительная поверхность емкостных датчиков совпадает с внутренней поверхностью плоской верхней крышки. Подробное описание датчиков будет приведено после оформления патентов.

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.

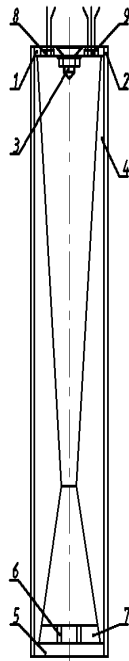


Рис. 1. Схема ТТ: 1-верхняя крышка; 2-цилиндрический корпус ТТ; 3-конический турбулизатор; 4-капиллярно-пористая вставка; 5-нижняя крышка; 6-инжекторные каналы; 7-капиллярно-пористый испаритель; 8,9-емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину слоя жидкого конденсата.

Внешние диаметры круговых слоев последовательно уменьшаются таким образом, что боковая поверхность испарителя в сборе образует острый конус с полным углом при вершине, равным  $41^\circ$ , совпадающим с углом конфузорного канала капиллярно-пористой вставки. Испаритель как целое дополнительно оснащен инжекторными паровыми каналами диаметром 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 также 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 скреплены и прошиты тонкой проволокой диаметром 0.05 мм, стежки длиной 5-7 мм вдоль образующей вставки. Восемь линий стежков проволоки, скрепляющих в радиальном направлении слои сетки, в плане повернуты друг относительно друга на

$45^\circ$  и образуют жесткую конструкцию капиллярно-пористой вставки с внутренним паровым каналом, выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лавалля. 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 77.4K ( $-195.75^\circ\text{C}$ ) собранная капиллярно-пористая вставка вместе с испарителем на нижней плоской крышке 5 плотно вставлена в цилиндрическую обечайку 2 ТТ. 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 конфузорного участка сопла 13 мм, полный угол конфузорного участка  $41^\circ$ , длина диффузорного участка сопла 81 мм, полный угол диффузорного участка  $8.5^\circ$ , длина цилиндрического участка в критическом сечении сопла 1 мм.

Зоны конденсации ТТ снабжены измерительными термомпарами и помещены в вихревой проточный калориметр, Рис.2. Для более точного измерения тепловой мощности и интенсификации съема тепла ТТ, струйный поток входящей воды закручивают, величины скорости течения и завихренности с помощью воздушных пузырьков фиксируют. Испаритель ТТ с помощью резистивного нагревателя подогревают и поддерживают при температуре, превышающей температуру кипения диэтилового эфира  $35.4^\circ\text{C}$  при атмосферном давлении на величину перегрева  $\delta T$ . 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 150W. На электроды емкостных датчиков подают электрические импульсы генератора с частотой следования  $10 \div 100\text{ kHz}$  и амплитудой 5V. Измерение частоты модуляции импульсов проводили через схему усиления и фильтрации 12, цифровой осциллограф 13 и компьютер 14.

Первые пульсационные течения в ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалля, см. рис.3, рис.4, возникают при перегреве испарителя  $\delta T \sim 4\text{K}$ , частота пульсаций (частота модуляции электромагнитных импульсов)  $f \sim 386\text{ Hz}$ . При увеличении перегрева испарителя  $\delta T \sim 15\text{K}$  частоты пульсаций в паровом канале ТТ возрастают до  $\sim 502\text{ Hz}$ , производная зависимости частоты пульсаций от температуры порядка  $10.5\text{ Hz/K}$ .

## ВИХРЕВЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

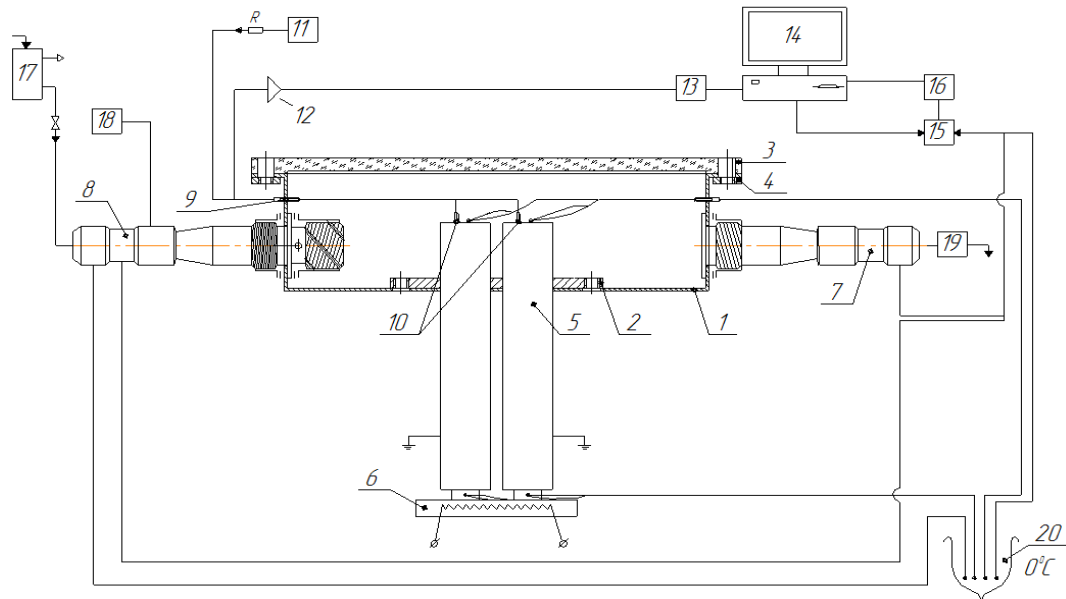


Рис.2. 1- Вихревой проточный калориметр; 2-фланец крепления тепловых труб; 3-стеклянная крышка; 4-крепление крышки; 5-тепловые трубы; 6-резистивный нагреватель; 7-выходной штуцер для воды; 8-входной штуцер для воды; 9-уплотнение измерительных проводов; 10-конденсаторные датчики измерения толщины слоя конденсата; 11-генератор импульсов Г5-56; 12-усилитель; 13-осциллограф АК ИП-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.

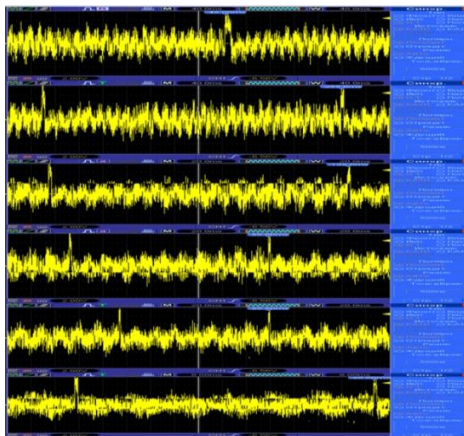


Рис.3. Осциллограммы возрастания частоты модуляции электрических импульсов в зависимости от тепловой нагрузки на ТТ. Ниже приведены результаты измерений частотных характеристик ТТ.

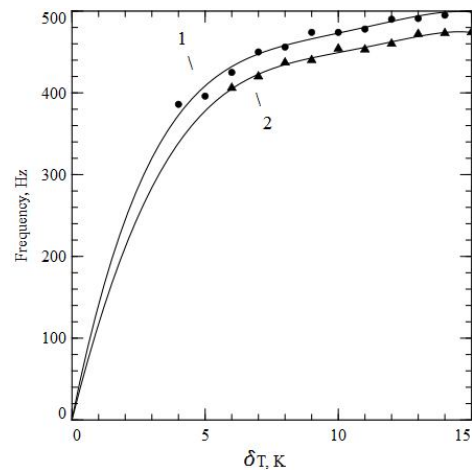


Рис.4. Экспериментальные значения частот модуляции электрических импульсов в зависимости от перегрева испарителя ТТ: 1- ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалю; 2- ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом, при равенстве внешнего диаметра ТТ и площади сечения капиллярно-пористых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

При исследовании ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом и при одинаковым внешним диаметром 20 мм, длиной 100 мм и толщиной испарителя и капиллярно-пористой вставки 3 мм, первые пульсационные течения возникают при перегреве испарителя  $\delta T \sim 6\text{K}$ , частота пульсаций (частота модуляции электромагнитных импульсов)  $f \sim 406\text{ Hz}$ . При увеличении перегрева  $\delta T \sim 15\text{K}$  частоты пульсаций в цилиндрическом паровом канале увеличиваются до 474 Hz, производная зависимости частоты пульсаций от температуры порядка 7.5 Hz/K.

Зона нечувствительности емкостных датчиков в цилиндрическом канале ТТ, определяемая начальным конвективным характером течения 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 Hz – 502 Hz, по сравнению с диапазоном пульсаций 406 Hz – 474 Hz в цилиндрическом паровом канале. Погрешность измерения частоты пульсаций измерительным трактом не превышает 3-5 Hz. Представлены результаты моделирования течений 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 [5]. 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. При всех рабочих параметрах ТТ наблюдался пленочный тип конденсации. Толщина пленки конденсата не превышает 1мм.

Испарительный режим в ТТ существует при малых тепловых нагрузках на испаритель, до 8-10 Вт/см<sup>2</sup>, и характеризуется близким к конвективному течением в паровом канале.

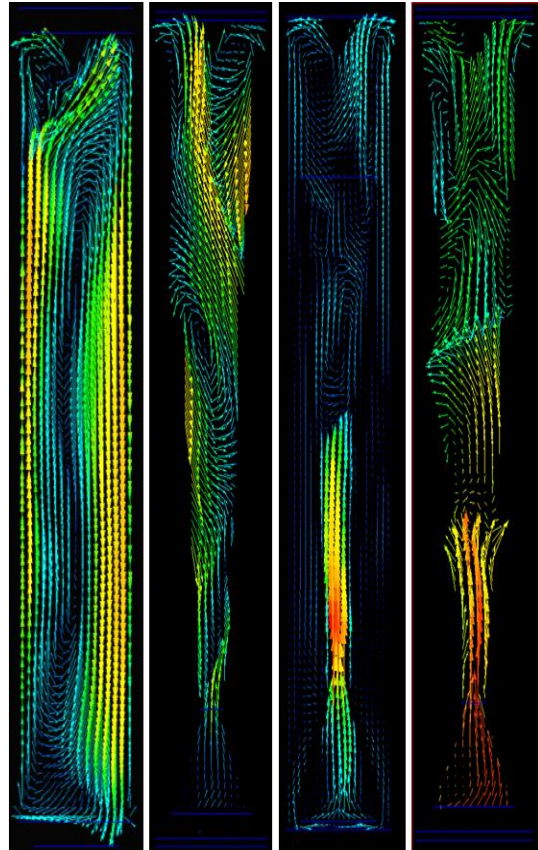


Рис.5. Расчетные значения пульсаций скорости потока пара в паровом канале ТТ.

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

Испарительный режим работы коротких ТТ, при котором тепловая мощность, поступающая в испаритель, постоянна во времени и ограничена величиной, не допускающей возникновения процесса пузырькового кипения в плоском сеточном испарителе, определяют следующим образом

$$E = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} < E_B \quad (1)$$

**ВИХРЕВЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ  
КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ**

Скорость испарения массы сухого мономолекулярного пара над испарителем вычисляют по уравнению

$$\dot{M} = \dot{n}_{vp} m_{vp} = \frac{E}{r(T_B)} \quad (2)$$

Массовый поток насыщенного сухого мономолекулярного пара над испарителем вычисляют обычным образом

$$G_{vp} = \dot{M} = F(z)n_{vp}(T_{ev})m_{vp}u_{vp} \quad (3)$$

Скорость роста числа молекул пара над испарителем в конфузурной части сопла парового канала, задающая избыточное давление над испарителем и определяющая массовый расход пара в ТТ, вычисляют по уравнению

$$\dot{n}_{vp} \cong \frac{E}{r(T_B)m_{vp}} = \frac{EN_A}{r(T_B)\mu_{vp}} \quad (4)$$

В приближении равных скоростей и без учета струйного характера течения, линейную скорость гидродинамического течения потока пара над поверхностью испарителя оценивают по формуле

$$u_{vp} \cong \frac{\dot{n}_{vp}}{F(z)n_{vp}(T_{ev})} = \frac{E}{F(z)r(T_B)m_{vp}n_{vp}(T_{ev})} = \frac{EN_A}{F(z)r(T_B)\mu_{vp}n_{vp}(T_{ev})} \quad (5)$$

Подставляют выражения (5) и (4) в уравнение (3) и в результате получают формулу для расчета молекулярного расхода сухого пара над испарителем

$$G_{vp} \cong \rho_{vp}(T_{ev}) \frac{EN_A}{r(T_B)\mu_{vp}n_{vp}(T_{ev})} \quad (6)$$

Гидродинамический поток массы насыщенного сухого пара определяют величиной перепада давления между испарителем и областью конденсации ТТ по формуле

$$G_{vp} \cong A \frac{\rho_{vp}(T_{cond})F(z)^2(P(T_{ev})-P(T_{cond}))}{\eta L} = A \frac{F(z)^2 \Delta P_{vp}}{\eta L} \quad (7)$$

Приравнивают массовый и гидродинамический расход пара, и в результате получают уравнение

$$G_{vp} \cong A \frac{\rho_{vp}(T_{cond})F(z)^2(P(T_{ev})-P(T_{cond}))}{\eta L} = \rho_{vp}(T_{ev}) \frac{EN_A}{r(T_B)\mu_{vp}n_{vp}} \quad (8)$$

Избыточное давление над испарителем, определяющее перенос потока пара в паровом канале ТТ, вычисляют в линейном приближении по уравнению

$$P(T_{ev}) \cong P(T_{cond}) + \frac{dP}{dT}(T_{ev}-T_{cond}) \quad (9)$$

С учетом уравнения Клапейрона-Клаузиуса величину производной давления пара рабочей жидкости по температуре оценивают обычным образом, при этом учитывают тот факт, что для капельных жидкостей отношение удельных объемов пара и жидкости мало,  $v^L/v^{VP} < 10^{-2}-10^{-3}$  поэтому в уравнении Клапейрона-Клаузиуса величиной удельного объема жидкости  $v^L$  пренебрегают, и в результате в идеально-газовом приближении получают выражение

$$\frac{dP}{dT} = \frac{1}{T} \frac{r(T)}{v^{VP} - v^L} \cong \frac{1}{T_{cond}} \frac{r(T_{cond})}{v^{VP}} \cong \frac{\rho_{vp}(T_{cond})r(T_{cond})}{T_{cond}} \quad (10)$$

Подставляют выражение (10) в (8), и получают уравнение для расчета расхода пара в ТТ

$$\frac{F(z)^2 r(T_{cond}) \rho_{vp}(T_{cond})}{\eta L} (T_{ev} - T_{cond}) \cong \frac{EN_A}{r(T_{cond}) \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})} \quad (11)$$

Температура пара непосредственно над поверхностью испарителя при слабом испарении и при отсутствии кипения определяется из уравнения

$$T_{ev} \cong T_{cond} \left( 1 + \frac{EN_A \eta L}{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 r(T_{ev})^2 \mu_{vp} n_{vp}(T_{ev})} \right) \leq \leq T_B \quad (12)$$

Стационарный испарительный режим работы ТТ означает, что температура в испарителе не превышает температуру кипения рабочей жидкости.

Передаваемую ТТ тепловую мощность  $E$ ,  $W$ , определяют из уравнения

$$E \cong \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 r(T_{ev})^2 \mu_{vp} n_{vp}(T_{cond})}{N_A \eta L T_{cond}} (T_{ev} - T_{cond}) = \quad (13)$$

$$= K_{HP} \Delta T$$

а коэффициент теплопередачи через поперечное сечение парового канала ТТ, вычисляют из выражения

$$K_{HP} \cong \frac{\rho_{vp}(T_{cond}) F(z)^2 r(T)^2 \mu_{vp} n_{vp}(T_{cond})}{N_A \eta L T_{cond}} \quad (14)$$

При большой скорости поступления тепла в тонкий испаритель, превышении его средней температуры над температурой кипения рабочей жидкости и возникновении пузырькового кипения и интенсивного парообразования, гидродинамический поток пара в конфузальной части сопла не успевает отводить выделяемую при кипении в испарителе тепловую мощность. При этом вместе с паром вылетают и микрокапли, поток становится двухфазным. Плотность пара возрастает, давление возрастает, и зависящая от давления температура кипения рабочей жидкости увеличивается таким образом, что становится выше средней температуры испарителя. В результате повышения давления кипение в испарителе прекращается (замедляется), и волна избыточного давления распространяется по паровому каналу до области конденсации ТТ, где пар становится пересыщенным и конденсируется. Процесс конденсации происходит не мгновенно, и при замедленной (прекращенной) работе испарителя продолжается до тех пор, пока давление не снизится до давления насыщения пара при температуре конденсации, после чего конденсация прекращается. Процесс понижения давления насыщенного пара за счет конденсации рас-

пространяется по паровому каналу ТТ обратно в испаритель, и кипение в нем возобновляется. Пульсации давления в паровом канале ТТ являются следствием кипения и интенсивного паровыделения в испарителе, немгновенного массопереноса по паровому каналу в область конденсации ТТ, и процесса конденсации, обуславливающего понижение давления пара сначала в области конденсации, а затем и в испарителе ТТ. После чего следующий пульсационный цикл испарения пара повторяется. Тепловую мощность, поступающую в плоский сеточный испаритель короткой ТТ, при температуре испарителя, превышающей температуру кипения  $T_B(p)$  рабочей жидкости, определяют из уравнения

$$E = \frac{[T_{ev} - T_B(P)] F(z)}{R_{ev}(T)} \quad (15)$$

Влажный пар считают состоящим из двух подсистем: из системы микрокапель и системы сухого пара. Скорость испарения массы влажного парок капельного потока определяют стандартным образом

$$\dot{M} = G_{mix} = G_{vp} + G_{dr} \quad (16)$$

С целью упрощения построения аналитической модели, реальный парок капельный поток над испарителем, с микрокаплями, размеры которых заданы сложной функцией распределения с двумя максимумами [6], представляют в виде монодисперсной системы сферических микрокапель, со средним арифметическим радиусом микрокапель  $r_a$ , часто применяемом при анализе двухфазных парок капельных течений

$$r_a = \frac{1}{n_{dr}} \sum_{i=0}^{\infty} r_{dri} n_{dri} \quad (17)$$

С учетом принятого допущения о сферичности микрокапель, записывают выражение для истинной степени влажности парок капельного потока

$$\gamma = \frac{M_{dr}}{M_{dr} + M_{vp}} = \left[ 1 + \frac{\rho_{vp}}{\rho_L} \left( \frac{3}{4\pi} \frac{1}{r_a^3 n_{dr}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (18)$$

Плотность влажного парок капельного потока вблизи поверхности конденсации без учета относительных скоростей фаз вычисляют с помощью плотностей капель и сухого

## ВИХРЕВЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

насыщенного пара стандартным образом по формуле

$$\rho_{vp}^{mix} = \frac{\rho_{dr}\rho_{vp}}{\gamma\rho_{vp} + (1-\gamma)\rho_{dr}} \quad (19)$$

Взаимосвязь между расходной и истинной массовыми концентрациями микрокапель, или расходной и истинной степенями влажности, определяют из соотношения

$$\gamma_G = \frac{\gamma\psi}{(1-\gamma) + \gamma\psi}; \quad \psi = \frac{u_{dr}}{u_{vp}} \quad (20)$$

Величина  $\gamma_G$  представляет собой отношение расхода конденсированной капельной фазы ко всему расходу двухфазной парокапельной среды, и с учетом выражения (18) выглядит следующим образом

$$\gamma_G = \left[ 1 + \frac{\rho_{vp}}{\rho_L\psi} \left( \frac{3}{4\pi} \frac{1}{r_a^3 n_{dr}} - 1 \right) \right]^{-1} = \frac{G_{dr}}{G_{mix}} \quad (21)$$

Массовый расход микрокапель с поверхности испарителя считают пропорциональным скорости испарения и массовой скорости потока пара

$$G_{dr} \cong B \left( \frac{E}{r(T_{ev})} \right)^a \left( \frac{G_{vp}}{F} \right)^b \quad (22)$$

Для оценки расхода влажного пара из испарителя в область конденсации ТТ, применяют уравнение (7), в котором вкладом подсистемы микрокапель в создание избыточного давления двухфазной парокапельной смеси над испарителем  $P(T_{ev})$  в паровом канале ТТ в первом приближении пренебрегают

$$G_{mix} = G_{vp} + G_{dr} \cong \frac{\rho_{vp}^{mix} F(z) \Delta P_{vp}}{\eta_{mix} L} \quad (23)$$

Следствием кипения в испарителе является повышение давления пара над поверхностью испарителя до величины  $P^*$ , при котором кипение в поверхностных слоях и далее во всем тонком испарителе (толщиной 2-3 мм) замедляется (прекращается) в связи с тем, что средняя температура испарителя  $T_{ev}$  становится меньше температуры кипения рабочей жидкости в испарителе при повышенном давлении в стесненных условиях

$$T_{ev} < T_B(P^*) \quad (24)$$

При этом импульс избыточного давления пара начинает распространяться по паровому каналу ТТ к области конденсации.

Прекращение кипения и замедление парообразования в испарителе ТТ приводит к существенному снижению (прекращению) тепловыделения, и уменьшению переноса влажного пара вдоль парового канала ТТ в зону конденсации. Длительность периода  $\Delta\tau_{ev}$  роста давления до величины  $P^*$  и прекращения кипения в капиллярно-пористом испарителе оценивают в линейном приближении внутри парового канала ТТ по формуле

$$\Delta\tau_{ev} \cong \frac{[P^* - P(T_{cond})] F(z) L}{k_B T_{ev} n_{vp}} \cong \frac{[P^* - P(T_{cond})] F(z) L r(T_B) m_{vp}}{E k_B T_{ev}} \quad (25)$$

Время релаксации (сброса) избыточной энергии (повышенного давления) в испарительной зоне путем переноса потока пара к зоне конденсации ТТ, оценивают по формуле

$$\Delta\tau_{HP} \cong \frac{E \Delta\tau_{ev}}{r(T_B) \rho_{vp}^{mix}(T_{ev}) u(T_{ev}) F(z)} \quad (26)$$

Время релаксации избыточного давления  $\Delta\tau_{HP}$  частично определяет длительность периода пульсирующих колебаний потока пара в паровом канале ТТ, в течение которого импульс давления пара, образовавшийся над испарителем, достигает поверхности конденсации и частично конденсируется. Длительность периода конденсации  $\Delta\tau_{cond}$ , в течение которого избыточное давление в паровом канале снижается до величины  $P(T_{cond})$ , оценивают из следующего уравнения

$$\Delta\tau_{cond} \cong \frac{E \Delta\tau_{ev}}{r(T_{cond}) \rho_{vp}^{mix}(T_{cond}) u(T_{cond}) F(z)} \quad (27)$$

В результате образования жидкой фазы, давление у охлаждаемой поверхности конденсации снижается до величины

$$P^* \cong P(T_{cond}) \quad (28)$$

это приводит к замедлению теплопереноса по паровому каналу, распространению волны разрежения от области конденсации к испарителю, и началу следующего цикла



пульсационного возрастания давления вблизи поверхности испарителя.

Таким образом длительность цикла пульсаций  $\tau_0$  в паровом канале ТТ

$$\Delta\tau_0 \cong \Delta\tau_{ev} + \Delta\tau_{HP} + \Delta\tau_{cond} + \Delta\tau_{sound} \quad (29)$$

Частота пульсаций

$$\nu \cong \frac{1}{\Delta\tau_{ev} + \Delta\tau_{HP} + \Delta\tau_{cond} + \Delta\tau_{sound}} \quad (30)$$

Анализ полученных экспериментальных данных по теплоотдаче над испарителем показывает, что разработанные ТТ работают в режиме кипения. Этот факт подтверждается характером влияния режимных параметров процесса испарения ( $q$ ,  $p$ ) на коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . Влияние этих параметров близко к подобному влиянию плотности теплового потока и давления на пузырьковое кипение в большом объеме.

Проведенные численные оценки по порядку величины дают длительность периода пульсаций в паровом канале коротких ТТ

$$\Delta\tau_0 \sim 10^{-2} \div 10^{-3} \text{с.}$$

$E$  – поступающая в испаритель ТТ тепловая мощность, W;

$E_B$  – тепловая мощность, при которой начинается процесс кипения в сеточном испарителе, W ;

$\dot{M}$  – количество образующегося сухого пара над испарителем в единицу времени, kg/s;

$n_{vp}$  – скорость роста числа молекул пара над испарителем в единицу времени,  $\text{s}^{-1}$ ;

$m_{vp}$  – масса молекулы пара диэтилового эфира, kg;

$r(T_B)$  – удельная теплота испарения рабочей жидкости в тепловой трубе, J/kg, в общем случае зависящая от температуры и давления, J/kg;

$G_{VP}$  – массовый поток сухого насыщенного пара над испарителем, kg/s;

$G_{mix}$  – массовый поток влажного насыщенного пара над испарителем, kg/s;

$G_{dr}$  – массовый поток микрокапель насыщенного пара над испарителем, kg/s;

$F(z)$  – площадь поверхности испарителя внутри парового канала ТТ,  $\text{m}^2$ ;

$z$  – продольная координата вдоль центральной оси ТТ, m;

$n_{vp}(T_{ev})$  – среднее количество молекул сухого пара в единице объема над испарителем,  $\text{m}^{-3}$ ;

$u_{vp}$  – средняя скорость гидродинамического течения сухого пара над испарителем, m/s ;

$\rho_{VP}(T_{ev})$  – плотность пара диэтилового эфира над испарителем,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_{VP}^{mix}$  – плотность влажного пара,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$v_{VP}^*$  – удельный объем насыщенного пара,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$v^L$  – удельный объем рабочей жидкости на линии насыщения,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,

$N_A$  – число Авогадро,  $\text{mol}^{-1}$ ;

$\mu_{vp}$  – молярная масса пара диэтилового эфира,  $\text{kg}/\text{mol}$ ;

$A$  – безразмерная постоянная порядка единицы;

$P(T_{ev})$  – давление пара вблизи поверхности испарителя ТТ, Pa;

$P(T_{cond})$  – давление пара вблизи поверхности конденсации ТТ, Pa;

$P^*$  – давление пара над поверхностью испарителя, при котором останавливается процесс кипения в капиллярно-пористом испарителе, Pa;

$k_B$  – постоянная Больцмана,  $k_B = 1.38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости сухого пара, Pa·s;

$\eta_{mix}$  – коэффициент динамической вязкости влажного пара с микрокаплями, Pa·s;

$L$  – длина парового канала ТТ, m;

$\Delta P_{vp}$  – разность давления пара над испарителем и вблизи поверхности конденсации в паровом канале ТТ, Pa;

$T_{ev}$  – температура поверхности испарителя, K;

$T_{cond}$  – температура поверхности конденсации, K;

$T_B(P)$  – температура кипения рабочей жидкости, K;

$dP/dT$  – производная давления по температуре пара диэтилового эфира (рабочей жидкости) внутри ТТ, Pa/K;

$K_{HP}$  – коэффициент теплопередачи через поперечное сечение парового канала ТТ,  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ;

$R_{ev}(T)$  – тепловое сопротивление плоского испарителя, включая внешнюю стенку ТТ,  $\text{K}/\text{W}/\text{m}^2$ ;

$r_a$  – средний арифметический радиус микрокапель двухфазного парок капельного потока, m;

$r_{dri}$  – радиус  $i$ -ой микрокапли в единице объема парок капельного потока над испарителем, m;



## ВИХРЕВЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

$n_{dri}$  – количество микрокапель рабочей жидкости с радиусом  $r_{dri}$  в единице объема паракапельной среды,  $1/m^3$ ;

$n_{dr}$  – суммарное количество микрокапель всех размеров в единице объема паракапельного потока над испарителем,  $1/m^3$ ;

$\gamma$  – истинная степень влажности паракапельного потока;

$M_{dr}$  – суммарная масса микрокапель (drops) в единице объема паракапельного потока, kg;

$M_{vp}$  – масса пара (vapour) в единице объема паракапельного потока над испарителем, kg;

$\rho_{vp}$  – плотность сухого пара,  $kg/m^3$ ;

$\rho_L$  – плотность микрокапель рабочей жидкости,  $kg/m^3$ ;

$\gamma_G$  – степень расходной влажности паракапельного потока;

$\psi$  – коэффициент скольжения фаз паракапельного потока, равный отношению средних скоростей движения микрокапель и паровой фазы внутри парового канала ТТ;

$u_{dr}$  – средняя скорость движения микрокапель в паровом потоке, m/s;

$B$  – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства рабочей жидкости и структурные параметры испарителя (пористость, характерный размер каналов и пор);

$a$  и  $b$  – численные коэффициенты;

$P^*$  – повышенное давление пара рабочей жидкости, при котором прекращается кипение в поверхностных слоях испарителя, Pa;

$\Delta T_{ev}$  – длительность процесса роста давления до прекращения кипения в испарителе, s;

$\Delta T_{HP}$  – длительность распространения импульса давления по паровому каналу ТТ, s;

$\Delta T_{cond}$  – длительность процесса снижения давления при конденсации вблизи поверхности конденсации ТТ, s;

$\Delta T_0$  – длительность цикла пульсации давления внутри парового канала ТТ, s.

Для коротких низкотемпературных ТТ установлено следующее:

Возникновение пульсационного режима течения в паровом канале начинается при тепловой нагрузке, при которой в испарителе имеет место развитое кипение, приводящее к интенсивному выделению пара и повышению давления до величины, при которой температура кипения рабочей жидкости превышает температуру испарителя. При достижении такого давления кипение в испарителе прекращается, волна образовавшегося пара до-

ходит до области конденсации ТТ, где давление снижается за счет конденсации, и после возвращения волны разрежения в испаритель, кипение рабочей жидкости в нем возобновляется. Пульсационный цикл течения в паровом канале повторяется.

Коэффициент теплопередачи через поперечное сечение коротких ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалья, равен  $(22 \pm 1) \cdot 10^4$  W/m<sup>2</sup>K, коэффициент теплопередачи через поперечное сечение ТТ с цилиндрическим паровым каналом  $(15 \pm 1) \cdot 10^4$  W/m<sup>2</sup>K при одинаковой минимальной толщине слоя капиллярно-пористой вставки 3 mm.

Термическое сопротивление ТТ с паровым каналом в виде сопла  $0.026 \pm 0.01$  K/W, термическое сопротивление ТТ со стандартным цилиндрическим паровым каналом  $0.032 \pm 0.01$  K/W. Сопоставление теплопередающих характеристик коротких ТТ показывает значимые преимущества ТТ с паровым каналом в виде сопла, близкого к соплу Лавалья по сравнению со стандартным цилиндрическим каналом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гупта А.К., Лилли Д. Г., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир. 1987.
2. Патент № 2431101 RF, F 28D 15/00/ Способ заполнения тепловых труб. Серяков А.В. Опубликовано 10. 10. 2011. Бюллетень 28.
3. 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.
4. Seryakov A.V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes // International Journal of Engineering Research & Technology 2013, v.2, № 8, pp. 1595 – 1603.
5. 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.
6. Lee R., Reges J., Almenas K. Size and number density change of droplet populations above front during reflood // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1984. v.27. N4. p. 573-585.

**Серяков А.В.** - Научная лаборатория, Научно-производственное предприятие «Медгаз» ул. Можайское шоссе, 29, 121471, г. Москва, Россия, e-mail: seryakovav@yandex.ru.