

УДК 536.248.2

*Приведені результати досліджень по візуалізації роботи 1-, 4-, 6-, 8-, 10-виткових замкнутих пульсаційних теплових труб при різній орієнтації у просторі. Описані картини руху потоку теплоносія в основних режимах роботи та виявлено фактори, що на них впливають*

*Ключові слова: пульсаційна тепла труба, візуалізація, картини руху*

*Приведены результаты исследований по визуализации работы 1-, 4-, 6-, 8-, 10-витковых замкнутых пульсационных тепловых труб при различной ориентации в пространстве. Описаны картины движения потока теплоносителя в основных режимах работы и выявлены влияющие на них факторы*

*Ключевые слова: пульсационная тепловая труба, визуализация, картины движения*

*The results of visualization of closed loop pulsating heat pipes with 1, 4, 6, 8, 10 turns at different orientation in space are presented. Flow patterns of basic operating modes are described*

*Keywords: oscillating heat pipe, visualization, flow patterns*

# КАРТИНЫ ДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОСНОВНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

**Е.С. Алексик**

Аспирант\*

Контактный тел.: 063-261-79-59

E-mail: alexeik\_kpi@ukr.net

**В.Ю. Кравец**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 066-780-99-50

E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

\*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

## 1. Введение

В настоящее время во многих областях науки, техники и промышленности актуальной является задача отведения тепловых потоков больших плотностей. Достаточно успешно с ней справляются тепловые трубы (ТТ) с капиллярно-пористой структурой (КПС) и термосифоны. Однако, технология изготовления ТТ связана с определенными трудностями, вызванными изготовлением металлической КПС и её припеканием к оболочке ТТ. Применение же термосифонов, изготовление которых проще за счет отсутствия КПС, ограничено их неработоспособностью в горизонтальном положении, при малых углах наклона и против сил тяжести.

Объединить возможность работы при любой ориентации в пространстве ТТ и простоту конструкции термосифонов позволяет новый тип тепловых труб – пульсационные тепловые трубы (ПТТ).

Впервые ПТТ была описана в [1]. Конструктивно она представляет собой герметичный вакуумированный змеевик, изготовленный из металлического капилляра и частично заполненный жидкостью. Теплопередача в ПТТ осуществляется не только в испарительно-конденсационном цикле, как в обычных ТТ, но и благодаря теплоотдаче от движущихся из зоны нагрева (ЗН) в зону конденсации (ЗК) жидкост-

ных снарядов, формирующихся из теплоносителя под действием капиллярных сил и сил поверхностного натяжения. Поэтому изучение особенностей движения снарядов является актуальной задачей для понимания процессов тепломассопереноса в ПТТ.

Одним из наиболее эффективных методов исследования движения потока теплоносителя является визуализация. Для её проведения макет ПТТ изготавливают из стеклянного капилляра, а протекание процессов, имеющих место при работе ПТТ, фиксируют с помощью фото и видеоаппаратуры.

В ряде работ, посвященных визуализации [2-5], основное внимание уделяется картинам течения потока теплоносителя, направлению его движения при работе ПТТ в различных режимах, движению отдельных снарядов и их взаимодействию, влиянию пленки жидкости на работу ПТТ. Также приводится анализ причин различных явлений, наблюдающихся при работе ПТТ, таких как смена направления движения потока теплоносителя и различные взаимодействия снарядов. Среди таких причин называются: испарение и конденсация жидкости, пузырьковое кипение в зоне нагрева, действие подъемных, капиллярных сил, а также сил давления и поверхностного натяжения, различные скорости движения отдельных снарядов.

Однако на движение снарядов также могут оказывать влияние физические свойства теплоносителя и

геометрические параметры ПТТ, например, внутренний диаметр капилляра и количество витков. В большинстве случаев в качестве теплоносителя применялся метанол [2, 3] или R-123 [4, 5] и лишь в одной работе один из наиболее распространенных теплоносителей, применяемых в ПТТ – вода [3]. Внутренний диаметр ПТТ практически во всех упомянутых работах составлял приблизительно 2 мм. Количество витков хоть и отличалось в различных исследованиях, но в пределах каждой отдельно взятой работы было постоянным. Исключение составляет лишь [4], где визуализация проводилась на ПТТ с различным количеством витков. Т.о., можно сделать вывод, что приведенных в литературе данных недостаточно для определения влияния вышеупомянутых параметров на движение потока теплоносителя.

Целью данной работы было проведение визуализации на ПТТ с различным количеством витков, внутренним диаметром 3,1 мм и теплоносителем водой, а также сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе данными.

## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

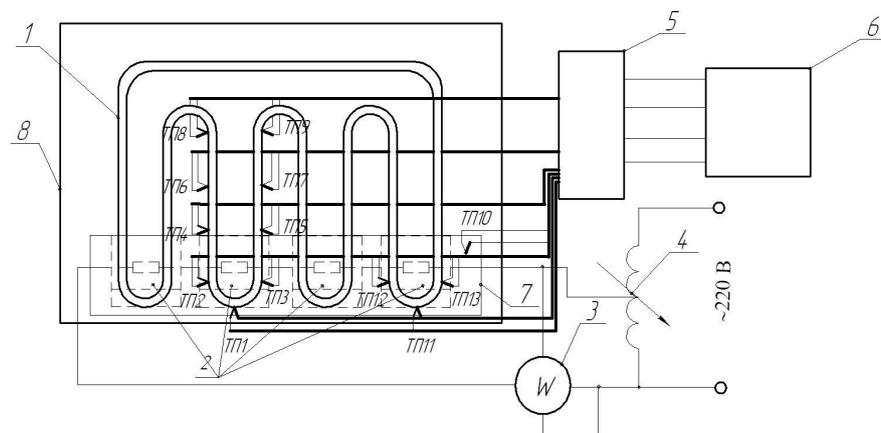


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ПТТ; 2 – электроннагреватель; 3 – ваттметр; 4 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 5 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – персональный компьютер (ПК); 7 – теплоизоляция; 8 – бокс; ТП1-ТП13 – термометры

Подробно экспериментальная установка описана в [6]. Основные отличия установки, изображенной на рис. 1, от представленной в [6] состоят в следующем. Исследуемая замкнутая стеклянная ПТТ 1 (рис. 1) имела внутренний диаметр 3,1 мм. Количество витков составляло 1 (замкнутая петля) 4, 6, 8 и 10. Высота витков – 190 мм, а расстояние между ними – 9 мм. Длина зоны нагрева составляла 50 мм. Трубы заправлялись водой с коэффициентом заправки (КЗ), т.е. отношением объема заправленной жидкости к общему объему ПТТ,  $50 \pm 5\%$ .

Эксперименты проводились при вертикальном положении ПТТ с нагревом снизу и при горизонтальном положении. Установка трубы в вертикальное положение осуществлялась путем закрепления её на штативе,

а в горизонтальное – при помощи подставки, не препятствующей охлаждению ПТТ окружающим воздухом. Для контроля температурного поля на внешнюю поверхность стенок ПТТ было установлено 12 термометров: ТП1-ТП3 и ТП11-ТП13 – в зоне нагрева двух разных витков, ТП4-ТП9 – в зоне конденсации одного витка. На внешней поверхности слоя теплоизоляции, покрывающего ЗН, также была установлена одна термометра (ТП10 на рис. 1) для контроля теплопотерь. Процессы, происходящие внутри ПТТ во время её работы, регистрировались при помощи видеокамеры (на рис. 1 не показана).

В случае замкнутой петли использовались только термометры ТП1-ТП9, а теплоизоляция на ЗН и термометр ТП10 отсутствовали, что позволяло наблюдать за процессами, происходящими в ЗН.

## 3. Методика проведения эксперимента и обработки данных

В начале опыта ПТТ устанавливалась в вертикальное или горизонтальное положение, после чего на электроннагреватель 2 (рис. 1) подавалась определенная начальная мощность. На персональном компьютере (ПК) запускалось соответствующее программное обеспечение, позволяющее наблюдать за изменениями показаний термометров в реальном времени и производить их запись на протяжении всего эксперимента. При проведении опыта подведенная мощность увеличивалась с определенным фиксированным шагом. Увеличение мощности продолжалось до тех пор, пока в ЗН не начинались кризисные явления, о чем свидетельствовал резкий непрерывный рост показаний термометров ТП1-ТП3, ТП11-ТП13. В начале и в конце эксперимента фиксировались показания ртутного термометра (на рис. 1 не показан), измеряющего температуру охлаждающего воздуха.

По данным опыта для каждого значения подведенной мощности определялись потери тепла с внешней поверхности изоляции:

$$Q_n = \alpha F_{из} (t_{из} - t_v), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$F_{из}$  – площадь внешней поверхности изоляции, м<sup>2</sup>;

$t_{из}$  – средняя температура поверхности изоляции, определяемая по показаниям термометра ТП10 (в случае замкнутой петли использовалась средняя температура внешней поверхности ЗН), К;

$t_v$  – средняя температура окружающего воздуха, определяемая по показаниям ртутного термометра, К.

$\alpha$  определялся по методике, приведенной в [7] для случая свободного движения охлаждающей среды вдоль вертикальной пластины.

Далее определялась тепловая мощность, подводимая к ПТТ:

$$Q_{\text{подв}} = Q - Q_{\text{п}}, \tag{2}$$

где  $Q$  – мощность, определяемая по показаниям ваттметра, Вт.

Также рассчитывалась плотность подведенного теплового потока:

$$q_{\text{подв}} = Q_{\text{подв}} / F_{\text{ЗН}}, \tag{3}$$

где  $F_{\text{ЗН}}$  – площадь внешней поверхности ЗН, м<sup>2</sup>.

Полученные при проведении экспериментов видеозаписи анализировались на ПК при помощи видеоредакторов. При этом сравнивались записи, сделанные для ПТТ с различным количеством витков при одинаковых плотностях подведенного теплового потока.

#### 4. Результаты исследований

Наблюдение за работой ПТТ позволило выделить три основных режима работы данного вида ТТ: режим передачи теплоты теплопроводностью, термосифонный и пульсационный режимы. Последний, в свою очередь, можно подразделить на пульсационный режим без циркуляции и с циркуляцией теплоносителя по замкнутому контуру ПТТ. Следует отметить, что попытки выделить основные режимы работы ПТТ предпринимались и ранее [2, 8, 9]. Однако в данной работе представлена более подробная по сравнению с [2, 8] классификация режимов работы ПТТ и, в отличие от [9], не рассматриваются режимы с полным осушением ЗН, являющиеся для ПТТ по сути нерабочими.

Режим передачи теплоты теплопроводностью наблюдался при плотностях подводимого теплового потока до 650 Вт/м<sup>2</sup>. Характерной чертой данного режима является практически полное отсутствие движения теплоносителя в ПТТ, за исключением незначительного подъема жидкостных снарядов, обусловленного нагревом и расширением паровых снарядов, оказавшихся в ЗН на момент пуска ПТТ. Причем при различных пусках одной и той же ПТТ это движение начиналось в различных каналах либо не начиналось совсем. Это говорит о том, что на данное явление оказывает влияние начальное распределение снарядов. Следует заметить, что подобное движение наблюдали и авторы [2]. Однако, в [2] подъем снарядов происходил одновременно в большинстве каналов ПТТ, что приводило к кратковременному осушению ЗН, чего в данном исследовании не наблюдалось. Теплопередача между ЗН и ЗК при таком движении снарядов не происходит, поскольку снаряды перемещаются только в пределах ЗК. При этом отдельные снаряды могут частично выходить в ЗН из ЗН. В этом случае в них может происходить теплообмен конвекцией или наблюдаться конденсация, если снаряды паровые. Однако вклад этих процессов в общую теплопередачу ПТТ незначителен по сравнению с теплопроводностью по корпусу, при помощи которой передается основная часть теплоты в данном режиме.

Термосифонный режим наблюдался при плотностях подведенного теплового потока  $q=650-3000$  Вт/м<sup>2</sup>.

В этом режиме ПТТ работала как массив соединенных между собой термосифонов. Для него характерно чередование периодов покоя с периодами колебаний снарядов.

Периоды колебаний коротки и представляют собой быстрозатухающие колебания снарядов с большой амплитудой и малой частотой. Причиной возникновения колебаний является активация и работа центров парообразования (ЦПО) в ЗН. Работа ЦПО указывается как причина движения теплоносителя также в [10], где исследовалось кипение в капиллярах.

Можно выделить два механизма зарождения пульсационного движения в ПТТ: образование паровых снарядов в ЗН и кипение теплоносителя у мениска жидкостного снаряда. Образование паровых снарядов схематически представлено на рис. 2.

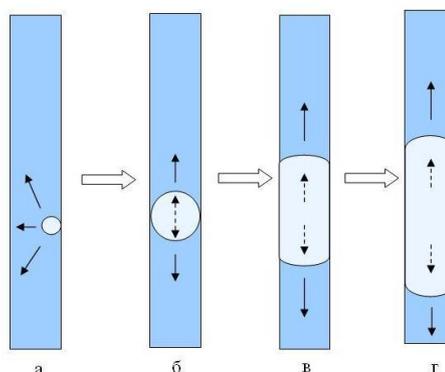


Рис. 2. Образование паровых снарядов в ЗН

На активном ЦПО внутри жидкостного снаряда зарождается и растет паровой пузырек (рис. 2а). Если его отрывной диаметр больше внутреннего диаметра капилляра, то со временем он занимает все сечение капилляра и разделяет надвое жидкостный снаряд, в котором образовался (рис. 2б). Вследствие испарения жидкости с менисков количество пара, а следовательно, и давление, в новообразованном паровом снаряде растет, он увеличивается в размерах и проталкивает жидкостные снаряды, находящиеся по обе стороны от него, инициируя тем самым их движение. Подобный процесс наблюдали также авторы [2, 10].

В случае второго механизма зарождения движения в ПТТ на активном ЦПО вблизи мениска жидкостного снаряда образуется и растет паровой пузырек (рис. 3а). От соседнего парового снаряда его отделяет пленка жидкости (рис. 3б). Постепенно пленка становится тоньше вследствие испарения части жидкости из неё в паровое пространство пузырька, и в определенный момент пленка исчезает, а пузырек лопается (рис. 3в). Возникающие при этом вследствие резкого выброса пара реактивные силы отталкивают жидкостный снаряд вниз (рис. 3г).

Кроме двух рассмотренных выше вариантов работы ЦПО в ЗН наблюдается также кипение в пленке жидкости. Оно происходит, если ЗН какого-либо витка ПТТ полностью занята паром и при этом в нее попадает пленка жидкости, стекающая из ЗК. Однако такое кипение не оказывает заметного влияния на движение теплоносителя в ПТТ.

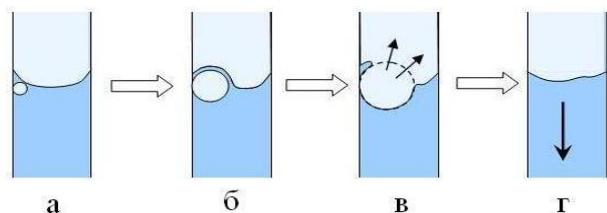


Рис. 3. Кипение у мениска

Снаряды, вытолкнутые из ЗН вследствие кипения теплоносителя, возвращаются благодаря «пружинящему» действию паровых снарядов. Жидкостный снаряд, движущийся из ЗН, сжимает находящийся вверх по потоку паровой снаряд, из-за чего давление в последнем возрастает. Возникающие при этом силы давления также возрастают и, превысив силы, поднимающие жидкостный снаряд, инициируют его возвратное движение (рис. 4). Аналогичное явление указывается авторами [2] как причина возникновения пульсаций при запуске ПТТ. Но в данном исследовании пульсации в пусковом режиме работы ПТТ не возникали. После возврата жидкостных снарядов на исходные позиции наступал период полного отсутствия движения снарядов, т.е. период покоя.

Т.о. причиной возникновения колебаний снарядов в ПТТ является кипение теплоносителя в ЗН, а их поддержание и возврат теплоносителя в ЗН обеспечивается взаимодействием между снарядами в ЗК.

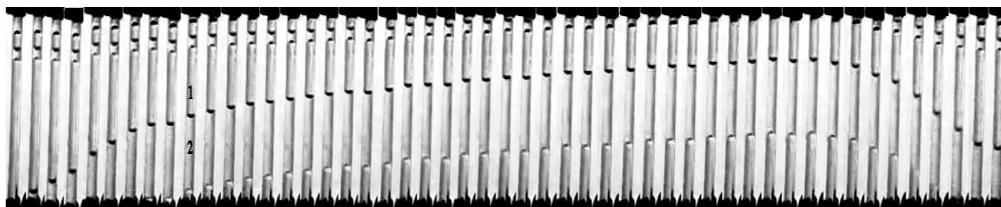


Рис. 4. «Пружинящее» действие паровых снарядов: 1 – пар; 2 – жидкость

Во время периодов покоя движение снарядов практически полностью отсутствовало, за исключением редких передвижений жидкостных снарядов из ЗН в ЗК под действием расширяющихся в ЗН паровых снарядов. Эти периоды достаточно длительны. Они возникают вследствие того, что в ЗН из ЗК постукает холодная жидкость, охлаждающая внутреннюю поверхность стенки ПТТ в ЗН и лишаящая её перегрева необходимого для начала и поддержания кипения. ЦПО, активизировавшиеся во время периода колебаний, прекращают действовать, и движение теплоносителя в ПТТ останавливается. Период покоя заканчивается лишь после того, как поступившая в ЗН жидкость догревается до температуры насыщения, а внутренняя поверхность стенки ЗН приобретет перегрев, достаточный для начала кипения. Следует заметить, что подобные периоды покоя наблюдались в работе [3], где также исследовались ПТТ, заправленные водой, а также в [9], где исследовалась петля с теплоносителем этанолом. Однако, при использовании метанола [2, 3] или фреона R-123 [4] данное явление не наблюдалось. Учитывая этот факт, а также то, что исследуемые в данной работе и в [3] ПТТ отличались по своим геометрическим параметрам и КЗ, можно сделать вывод, что

основным фактором, влияющим на наличие периодов покоя, являются физические свойства теплоносителя.

Дальнейшее увеличение плотности подводимого теплового потока приводило к уменьшению длительности периодов покоя, увеличению длительности периодов колебаний снарядов и увеличению частоты. В определенный момент ( $q \approx 3000-3800 \text{ Вт/м}^2$ ) периоды покоя исчезали, а колебания снарядов становились постоянными. Т.о. ПТТ переходила на пульсационный режим работы. Переход на пульсационный режим вызван двумя факторами, связанными с увеличением плотности подводимого теплового потока: рост количества действующих ЦПО и повышение температуры ЗН. Первый фактор способствует увеличению интенсивности колебаний снарядов и уменьшению времени их затухания. Второй фактор сокращает время нагрева жидкости, поступившей из ЗК в ЗН, настолько, что кипение в ней начинается раньше, чем затухают колебания, начавшиеся ранее. Т.о. в ПТТ поддерживаются постоянные колебания, а периоды покоя исчезают полностью. При этом механизм возникновения колебательного движения, его поддержания и возврата теплоносителя в ЗН остается таким же, как и в термосифонном режиме.

При плотности подведенного теплового потока больше  $3800 \text{ Вт/м}^2$  в 4-витковых ПТТ количество активных ЦПО в ЗН становилось настолько большим, что под действием срывающихся с них паровых пу-

зырьков поток теплоносителя начинал циркулировать по замкнутому контуру ПТТ. На циркуляционное движение потока накладывались продольные колебания снарядов. Такой режим работы ПТТ является пульсацион-

ным режимом с циркуляцией. Направление циркуляции (по или против часовой стрелки) – переменное. Причем смена направления происходила случайным образом. При этом «пружинящего» действия паровых снарядов в ЗК не наблюдалось, а возврат теплоносителя в ЗН обеспечивался проталкивающим действием паровых пузырьков, срывающихся с активных ЦПО. Следует заметить, что из всех исследованных в данной работе ПТТ циркуляция наблюдалась только в 4-витковых, хотя в литературе описаны случаи циркуляционного режима работы 7-витковых ПТТ, заправленных метанолом [2], и замкнутой петли с теплоносителем этанолом [11].

Как было отмечено выше, циркуляционный режим работы наблюдался только у 4-витковых ПТТ. У остальных труб при плотности подводимого теплового потока  $5000-6200 \text{ Вт/м}^2$  температура зоны нагрева становилась настолько высокой, что в входящих в неё из ЗК жидкостных снарядах происходило мгновенное вскипание, влекущее за собой кризис кипения и разрушение стеклянных корпусов ПТТ. Аналогичное явление наблюдалось и в 4-витковых ПТТ, однако происходило оно уже после циркуляционного режима работы. В замкнутой петле данное явление наблюда-

лось при  $q \approx 7000-7800 \text{ Вт/м}^2$  и сопровождалось периодическими осушениями ЗН, которые и приводили к росту её температуры до значений, достаточных для мгновенного вскипания жидкостных снарядов. При этом во время осушений всякое движение теплоносителя в петле прекращалось. В целом ситуация напоминала явление, предшествующее полному разделению фаз теплоносителя в замкнутой петле, описанное в [10]. Однако, в отличие от [10], в исследуемой петле в ЗН скапливался не весь пар. Некоторая его часть находилась в ЗК и, конденсируясь, вызывала увеличение массы жидкостных снарядов, благодаря чему они под действием сил гравитации возвращались в ЗН.

В горизонтальном положении ни одна из исследованных ПТТ не работала как теплопередающее устройство. При незначительных плотностях подведенного теплового потока ( $q \approx 550-1400 \text{ Вт/м}^2$ ) наблюдалось слабое движение отдельных снарядов, вызванное расширением оказавшихся в ЗН на момент пуска ПТТ паровых снарядов либо активацией единичных ЦПО в ЗН. Однако это движение происходило в основном в пределах ЗК и не способствовало теплопереносу между зонами. Через некоторое время работы в таком режиме ЗН полностью осушалась и ПТТ прекращала работать.

Осушение ЗН в горизонтальном положении происходит из-за накопления в ней мелких паровых пузырьков, срывающихся с активных ЦПО и не вызывающих колебаний жидкостных снарядов. При работе ПТТ в вертикальном положении подобные пузырьки, срываясь с ЦПО, поднимаются вдоль оси трубы вверх по потоку и объединяются с ближайшими паровыми снарядами. В случае же горизонтального положения пузырьки поднимаются поперек сечения канала, и задерживаются у стенки в ЗН. Постепенно количество пузырьков увеличивается, и они сливаются в паровые снаряды, полностью занимающие ЗН.

Еще одной причиной осушения ЗН при работе ПТТ в горизонтальном положении является отсутствие подпитки ЗН пленкой жидкости. При работе в вертикальном положении за проходящими по каналу ПТТ жидкостными снарядами на стенках трубы остается пленка жидкости, стекающая в ЗН под действием сил гравитации и препятствующая её осушению. В горизонтальном положении ввиду отсутствия действия сил гравитации такое явление не наблюдается.

Кроме описанного выше «пружинящего» действия паровых снарядов в ПТТ также наблюдались следующие взаимодействия между снарядами: сдавливание парового снаряда жидкостными, объединение снарядов, образование жидкостных снарядов из пленки жидкости.

Сдавливание парового снаряда происходит, когда он оказывается между двумя движущимися навстречу друг другу жидкостными снарядами. При этом паровой снаряд сжимается до размеров пузырька, под действием подъемных сил поднимается вверх (ориентация ПТТ вертикальная) и сливается с ближайшим паровым снарядом (рис. 5). Присоединение паровых

пузырьков к паровым снарядам наблюдалось также и в [3].

Объединение снарядов происходит вследствие различной скорости движения отдельных снарядов. Снаряд, имеющий большую скорость, при движении по каналу ПТТ наталкивается на снаряд с меньшей скоростью и объединяется с ним. Данный процесс характерен как для жидкостных (рис. 6), так и для паровых снарядов. При этом объединяющиеся жидкостные снаряды разделены мелким паровым снарядом, а паровые – жидкостным. Во время объединения снарядов мелкие разделяющие снаряды разрушаются. В частности, разрушение жидкостных снарядов происходит в результате расхода жидкости на пленку, остающуюся на внутренней поверхности стенок при прохождении снаряда по каналу ПТТ. Скорость движения снаряда, являющегося результатом объединения, отличается от скоростей снарядов, из которых он образовался. Объединение снарядов наблюдалось также и в [2,3]. Поскольку в данном исследовании и в [2,3] применялись различные теплоносители, а исследованные ПТТ отличались по своим геометрическим характеристикам и КЗ, то можно сделать вывод, что вышеперечисленные факторы не влияют как на наличие объединения снарядов, так и на характер протекания данного процесса.

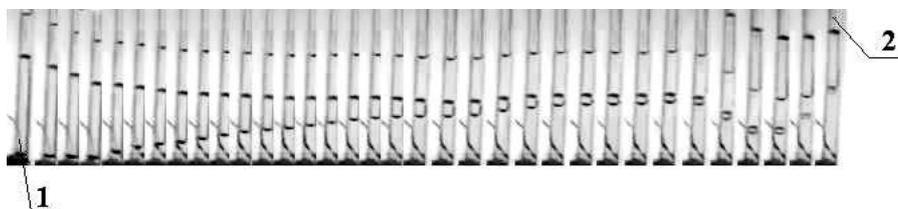


Рис. 5. Сдавливание парового снаряда: 1 – пар; 2 – жидкость

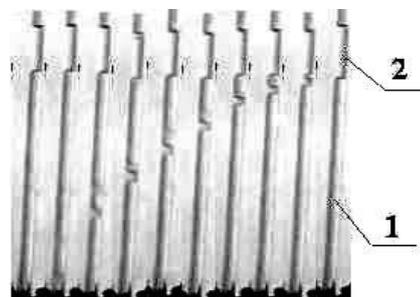


Рис. 6. Объединение снарядов: 1 – пар; 2 – жидкость

Как было отмечено выше, при движении жидкостного снаряда на внутренней поверхности стенок ПТТ образуется пленка жидкости. При вертикальной ориентации ПТТ с нагревом снизу она стекает в ЗН. По мере движения пленки в ЗК количество жидкости в ней увеличивается, благодаря конденсации пара, и со временем на стенке ПТТ образуется капля жидкости. В результате колебаний жидкостных снарядов рядом с такой каплей количество жидкости в ней скачкообразно увеличивается, она касается противоположной стенки канала и под действием сил поверхностного натяжения превращается в снаряд (рис. 7). В случае отсутствия колебаний капля стекает в зону нагрева.

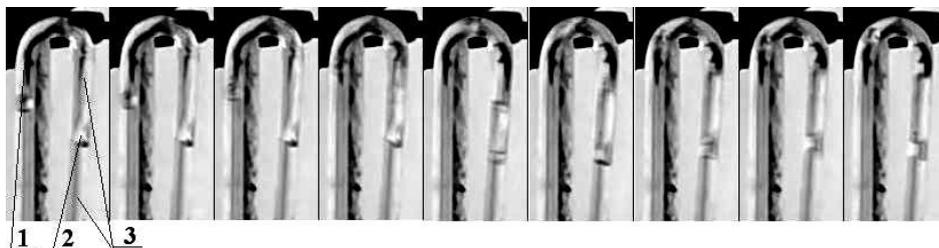


Рис. 7. Образование жидкостного снаряда из пленки жидкости: 1 – снаряд; 2 – капля; 3 – пар

Аналогичное явление наблюдается и в ЗН при работе ПТТ в вертикальном положении. Однако для образования жидкостного снаряда в таком случае колебания соседних снарядов не требуются. Он образуется под действием сил поверхностного натяжения, когда в ЗН накопится достаточное количество жидкости. Данный процесс имеет большое значение для работы ПТТ, поскольку способствует возврату жидкости в ЗН и препятствует её осушению.

Образование жидкостных снарядов из пленки жидкости в ЗН наблюдалось также в [2], а в ЗК – в [3]. При этом авторы [3] подчеркивают, что данный процесс в ЗК наблюдался только в ПТТ, заправленной водой. Отсюда можно сделать вывод, что наличие данного явления при работе ПТТ зависит от физических свойств теплоносителя.

Следует заметить, что вышеописанные процессы оказывают значительное влияние на работу ПТТ, поскольку они приводят к разрушению одних и образованию других снарядов. Это, в свою очередь, ведет к возникновению локальных изменений давления, которые распространяются по всей ПТТ и влияют на тепло- и массообмен в ней. При этом наличие данных процессов не зависит от количества витков. Данный параметр влияет только на интенсивность колебаний снарядов, поскольку увеличение количества витков приводит к увеличению суммарной площади ЗН, что ведет к увеличению количества действующих и потенциальных ЦПО.

## 5 Выводы

1. Можно выделить следующие основные режимы работы ПТТ: режим передачи теплоты теплопроводностью, термосифонный и пульсационный режимы. Причем наличие термосифонного режима зависит от теплофизических свойств теплоносителя, а пульсационный режим можно подразделить на пульсационный режим без циркуляции и с циркуляцией теплоносителя

по замкнутому контуру ПТТ.

2. Переход от одного режима к другому зависит от плотности подведенного теплового потока, количества активных ЦПО в ЗН и температуры ЗН.

3. Причиной возникновения колебательного движения снарядов в ПТТ является активация и работа ЦПО в ЗН. Поддержание

возникших колебаний и возврат теплоносителя в ЗН осуществляется за счет «пружинящего» действия паровых снарядов и образования жидкостных снарядов из пленки жидкости в ЗН.

4. В пульсационном режиме работы с циркуляцией «пружинящее» действие паровых снарядов отсутствует, однако наблюдаются случайные и независимые от геометрических параметров ПТТ, КЗ и физических свойств теплоносителя смены направления циркуляции.

5. В горизонтальном положении ни одна из исследованных ПТТ не работала как теплопередающее устройство. Это связано с осушением ЗН, вызванным накоплением в ней паровых пузырьков и отсутствием стекания пленки жидкости из ЗК.

6. Помимо «пружинящего» действия паровых снарядов и образования жидкостных снарядов из пленки жидкости в ЗН в ПТТ также наблюдаются следующие взаимодействия снарядов: сдавливание парового снаряда жидкостными, объединение снарядов, образование жидкостных снарядов из пленки жидкости в ЗК.

7. Объединение снарядов происходит независимо от геометрических характеристик ПТТ, КЗ и физических свойств теплоносителя. А основным фактором, влияющим на образование жидкостных снарядов из пленки жидкости в ЗК, являются физические свойства теплоносителя.

8. При взаимодействии снарядов происходит разрушение одних снарядов и образование других, что ведет к возникновению локальных пульсаций давления, распространяющихся по всей ПТТ и оказывающих значительное влияние на тепломассообмен в трубе.

9. Наличие взаимодействия снарядов в ПТТ не зависит от количества витков. Данный параметр влияет только на интенсивность колебаний снарядов, поскольку увеличение количества витков приводит к увеличению суммарной площади ЗН, что, в свою очередь, ведет к увеличению количества действующих и потенциальных ЦПО.

## Литература

1. Patent #4,921,041 U.S.A., F28D 15/02 Structure of a Heat Pipe [Текст] / Akachi H.; Inventor: Hisateru Akachi, Assignee: Actronics Kabushiki Kaisha – Appl. No. 207,318; Filed: Jun 15, 1988; Date of Patent: May 1, 1990. – 29 p.
2. Tong B.Y., Closed-loop pulsating heat pipe [Текст] / B.Y. Tong, T.N. Wong, K.T. Ooi // Applied Thermal Engineering, 2001. – vol. 21. – P. 1845-1862.
3. Xu J.L. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe [Текст] / J.L. Xu, Y.X. Li, T.N. Wong // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. – 48. – P. 3338–3351.
4. Khandekar S. Closed loop pulsating heat pipes. Part B: visualization and semi-empirical modeling [Текст] / S. Khandekar, P. Charoensawan, M. Groll, P. Terdtoon // Applied Thermal Engineering, 2003. – vol. 23. – P. 2021–2033.

5. Katpradit T. Internal flow patterns of closed-end oscillating heat pipes using non-azeotropic blend as working fluid at critical state [Текст] / Т. Katpradit, А. Tewata, К. Booddachan, S. Waowaew, P. Chareonsawan // 1st International Seminar on Heat Pipes and Heat Recovery Systems. – Monash University (Malaysia), 2004.
6. Кравец В.Ю. Влияние количества витков на теплопередающие характеристики пульсационных тепловых труб [Текст] / Кравец В.Ю., Алексеев Е.С. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2010. – №6/7. – С. 59-63.
7. Исаченко В.П. Теплопередача [Текст] / Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. – М.-Л.: Энергия, 1965.
8. В.Ю. Кравец Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе [Текст] / В.Ю. Кравец, А.Н. Наумова, А.Н. Вовкогон // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2010. – №1. – С. 39-43.
9. Khandekar S. Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe [Текст] / S. Khandekar, Anant Prasad Gautam, K. Pavan Sharma // International Journal of Thermal Sciences. – 2009. – 48. - P. 535–546.
10. Д.А. Лабунцов, Аналитическое исследование процесса кипения в трубках малого диаметра [Текст] / Д.А. Лабунцов, О.П. Евдокимов, И.В. Тишин, А.Ф. Ульянов // Изв. вузов. М.: Машиностроение, 1970. – № 7. – С. 68-73.
11. Khandekar S. Pulsating heat pipes: study on a two-phase loop [Текст] / S. Khandekar, M. Groll // 13<sup>th</sup> International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Budapest, Hungary. – 2003.

УДК 621.88.084.1

# ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ З'ЄДНАНЬ З НАТЯГОМ

*У роботі розглянуті питання методології та методики вибору, з допомогою розробленого програмного комплексу при проектуванні, технології технологічних параметрів складання з'єднань з натягом, зібраних термічними способами, з урахуванням енергозбереження*

*Ключові слова: з'єднання з натягом, термічний спосіб складання*

*В работе рассмотрены вопросы методологии и методики выбора, с помощью разработанного программного комплекса при проектировании, технологии технологических параметров сборки соединений с натягом, собранных термическими способами, с учетом энергосбережения*

*Ключевые слова: соединения с натягом, термический способ сборки*

*In the work the examined questions of methodology and procedure of selection with the aid of the developed program set with the design of the technology of the technological parameters of assembling the connections with the interference, assembled by thermal methods, taking into account energy-economy*

*Keywords: connection with the interference, the thermal method of assembling*

**І.Л. Оборський**

Кандидат технічних наук, доцент,  
заступник завідувача кафедрою

Кафедра машин легкої промисловості\*

Контактний тел.: 050-380-94-90; (044) 234-98-57

E-mail: ivan.oborskiy@mail.ru

**А.С. Зенкін**

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедрою

Кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

\*Київський національний університет

технологій та дизайну

вул. Немировича-Данченка, 2,

м. Київ, Україна, 01011

## 1. Вступ

У машинобудуванні набули широкого застосування відповідальні з'єднання з натягом (складені колеса залізничного транспорту, зубчасті колеса різних передач тощо), до яких пред'являють високі вимоги експлуатаційної міцності та надійності. Для їхнього складання використовують, як правило, термічні способи зборки (ТСН) з попереднім нагріванням деталі, що охоплює, або охолодження (ТСО) охоплюваної. Такі

способи формування з'єднань підвищують їхню міцність у порівнянні з запресуванням в 2 - 2,5 рази [1, 2].

Слід зазначити, що при створенні ряду відповідальних виробів використовують специфічні їх конструкції та важкі посадки з натягами, наприклад, при складанні складених коліс нової конструкції залізничного транспорту, які реалізувати окремо з нагріванням або охолодженням не представляється можливим. Для складання таких виробів можна використовувати тільки одночасне поєднання нагрівання й охолодження - комбінований термічний спосіб скла-