

---

---

## ЗАГАЛЬНОНАУКОВІ І СПЕЦІАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

---

---

УДК 536.248.2

### ВИЗУАЛИЗАЦІЯ ПРОЦЕСОВ МАСОПЕРЕНОСА В ПУЛЬСАЦІОННИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ

**Е.С. Алексеик, В.Ю. Кравец**

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»*

Приведены результаты исследований по визуализации работы 4- и 6-витковых замкнутых пульсационных тепловых труб при различной ориентации в пространстве. Описаны картины и особенности течения потока теплоносителя при работе труб в основных режимах. Дано описание взаимодействий снарядов и их причин. Выявлено влияние геометрических параметров пульсационных тепловых труб и физических свойств теплоносителей на вышеназванные процессы.

#### 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 ее 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. Под действием капиллярных сил и сил поверхностного натяжения из жидкости формируются снаряды. При наличии теплоподвода благодаря совокупному действию двух вышеуказанных сил, а также сил давления и гравитации в потоке теплоносителя, состоящего из жидкостных и паровых снарядов, возникает пульсационное движение снарядов из зоны нагрева (ЗН) в зону конденсации (ЗК). Также работа ПТТ сопровождается испарением и конденсацией теплоносителя. Таким образом, теплопередача в ПТТ осуществляется благодаря теплоотдаче от жидкостных снарядов и в испарительно-конденсационном цикле.

Одним из наиболее эффективных методов изучения движения потока теплоносителя является визуализация. Для ее 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.

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. Таким образом, в приведенных источниках [1 - 4] данных недостаточно для определения влияния геометрических параметров ПТТ и физических свойств жидкости на движение потока теплоносителя и отдельных снарядов.

### Постановка цели и задач научного исследования

Целью работы является анализ режимов работы замкнутых ПТТ при различной ориентации их в пространстве на основе проведенной визуализации. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования замкнутых ПТТ, проведена визуализация работы замкнутых ПТТ при различной ориентации в пространстве, проанализированы и описаны режимы циркуляции и особенности течения потока теплоносителя, исследовано влияние геометрических параметров ПТТ и физических свойств теплоносителей на режимы работы.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

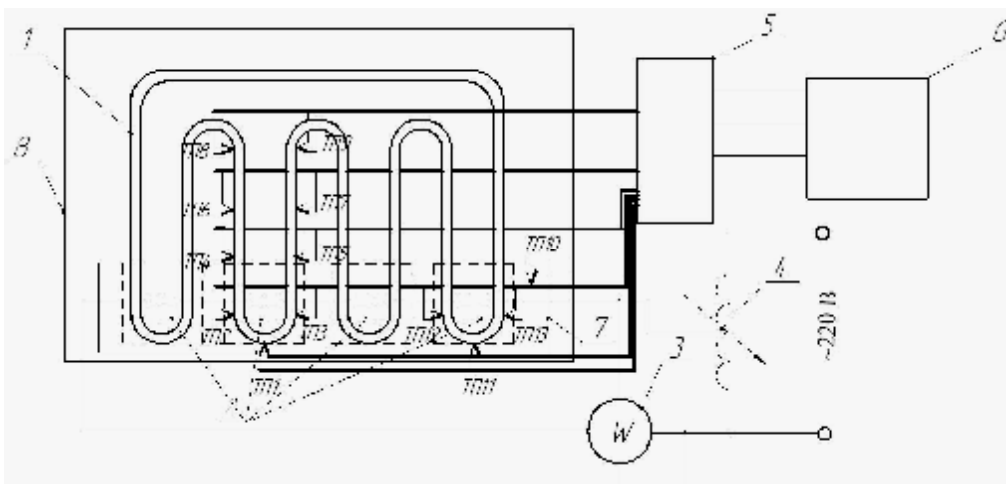


Рис. 1. Схема экспериментальной установки 1 – ПТТ; 2 – электронагреватель; 3 – ваттметр; 4 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 5 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – персональный компьютер (ПК); 7 – теплоизоляция; 8 – бокс; ТП1-ТП13 – термопары

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 (см. рис. 1) имела внутренний диаметр 3,1 мм. Количество витков составляло 4 и 6. Высота витков – 190 мм, а расстояние между ними – 9 мм. Длина зоны нагрева составляла 50 мм. Трубы заправлялись водой с коэффициентом заправки (КЗ), то есть 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 ее на штативе (рис. 2, а), а в горизонтальное – при помощи подставки, не препятствующей охлаждению ПТТ окружающим воздухом (рис. 2, б). Для контроля температурного поля на внешнюю поверхность стенок ПТТ было установлено 12 термопар: ТП1 - ТП3 и ТП11 - ТП13 – в зоне нагрева (ЗН) двух разных витков, ТП4 - ТП9 – в зоне конденсации (ЗК) одного витка. На внешней поверхности слоя теплоизоляции, покрывающего зону нагрева, также была установлена одна термопара (ТП10 на рис. 1) для контроля теплопотерь. Процессы, происходящие внутри ПТТ во время ее работы, регистрировались при помощи видеокамеры (на рис. 1 не показана).

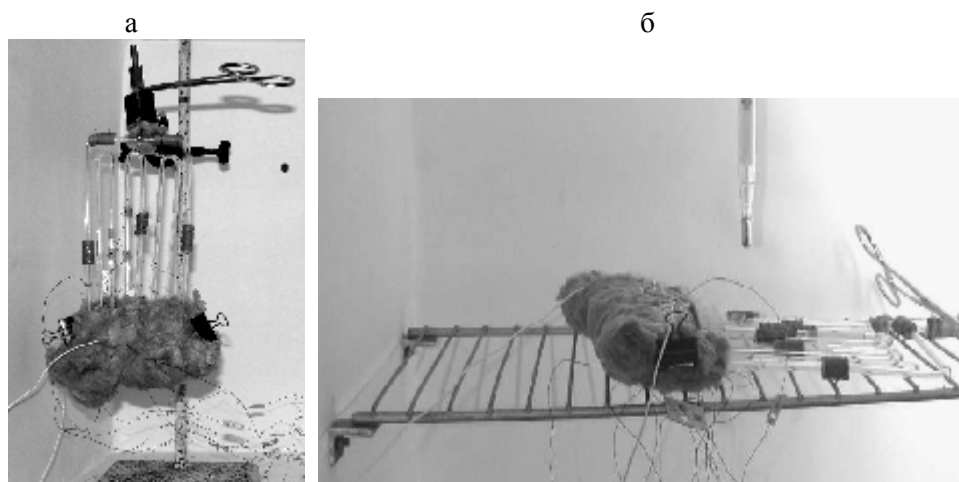


Рис. 2. Общий вид рабочего участка: а – вертикальное положение; б – горизонтальное положение

### Методика проведения эксперимента и обработки данных

Вначале проводился наладочный опыт для определения теплопотерь с поверхности изоляции. Для этого ПТТ устанавливалась в вертикальное или горизонтальное положение, после чего на электронагреватель 2 (см. рис. 1) подавалась определенная начальная мощность. На ПК запускалось соответствующее программное обеспечение, позволяющее наблюдать за изменениями показаний термопар 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 зоне нагрева не начинались кризисные явления, о чем свидетельствовал резкий непрерывный рост показаний термопар ТП1 - ТП3, ТП11 - ТП13. В начале и в конце наладочного эксперимента фиксировались показания ртутного термометра (на рис. 1 не показан), измеряющего температуру охлаждающего воздуха.

По данным наладочного опыта для каждого значения подведенной мощности определялись потери тепла с поверхности изоляции  $Q_{\text{п}}$ :

$$Q_{\text{п}} = \alpha \cdot F_{\text{из}} (t_{\text{из}} - t_{\text{в}}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К) (при расчетах принимался равным 7 Вт/(м<sup>2</sup>·К));

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

$t_{\text{из}}$  – температура поверхности изоляции, определяемая по показаниям термопары ТП10, К;

$t_{\text{в}}$  – температура окружающего воздуха, К.

Далее определялась тепловая мощность, подводимая к зоне нагрева ПТТ:

$$Q_{\text{подв}} = Q - Q_{\text{п}}, \quad (2)$$

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

После этого определялся коэффициент потерь:

$$k = Q_{\text{п}} / Q. \quad (3)$$

После проведения вышеуказанных вычислений задавалось определенное начальное значение плотности подводимого к зоне нагрева ПТТ теплового потока и шаг, с которым этот параметр будет изменяться при проведении эксперимента. По заданным значениям плотности теплового потока определялась заданная тепловая мощность  $Q_{\text{подв}}^{\text{зад}}$ , подведенная к зоне нагрева ПТТ:

$$Q_{\text{подв}}^{\text{зад}} = q^{\text{зад}} \cdot F_{\text{ЗН}}, \quad (4)$$

где  $q^{\text{зад}}$  – заданная плотность подводимого теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

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

Для каждого полученного значения  $Q_{\text{подв}}^{\text{зад}}$  с учетом коэффициентов потерь, полученных по выражению (3), задавались коэффициенты потерь  $k^{\text{зад}}$ . После этого строились графики зависимости  $k = f(Q_{\text{подв}})$  и  $k^{\text{зад}} = f(Q_{\text{подв}}^{\text{зад}})$ . Путем совмещения двух полученных кривых уточнялись значения  $k^{\text{зад}}$  и вычислялись значения мощности, которые будут устанавливаться на ваттметре при помощи ЛАТРа при проведении основных опытов:

$$Q^{\text{зад}} = Q_{\text{подв}}^{\text{зад}} (1 + k^{\text{зад}}), \quad (5)$$

Таким образом, при помощи проведения наладочного опыта и анализа полученных данных устанавливалась программа изменения мощности, подводимой к электронагревателю, позволяющая с учетом потерь поддерживать заданные плотности подводимого к зоне нагрева ПТТ теплового потока.

Основной опыт проводился аналогично наладочному, но при этом также велась видеозапись процессов, происходящих внутри ПТТ. По данным основных экспериментов при помощи выражений (1), (2) уточнялись значения  $Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{подв}}$ , а также определялось реальное значение плотности подводимого теплового потока из выражения (4).

По полученным в ходе проведения основных опытов показаниям термопар строились графики изменения температуры во времени. Полученные кривые анализировались на предмет амплитуды и частоты колебаний температуры. Полученные при про-

ведении основных экспериментов видеозаписи анализировались при помощи видеоредакторов. При этом сравнивались записи, сделанные для ПТТ с различным количеством витков при одинаковых значениях плотности подведенного теплового потока.

### Результаты исследований

Наблюдение за работой ПТТ производилось в пусковом и стационарном режимах. В пусковом режиме при вертикальной ориентации ПТТ и плотности подводимого теплового потока  $550...650 \text{ Вт/м}^2$  в отдельных каналах ПТТ наблюдался подъем жидкостных снарядов из ЗН в ЗК (рис. 3, а). Постепенно это движение распространялось на соседние каналы (рис. 3, б) и витки (рис. 3, в), после чего оно сменялось возвратным движением снарядов (рис. 3, г).

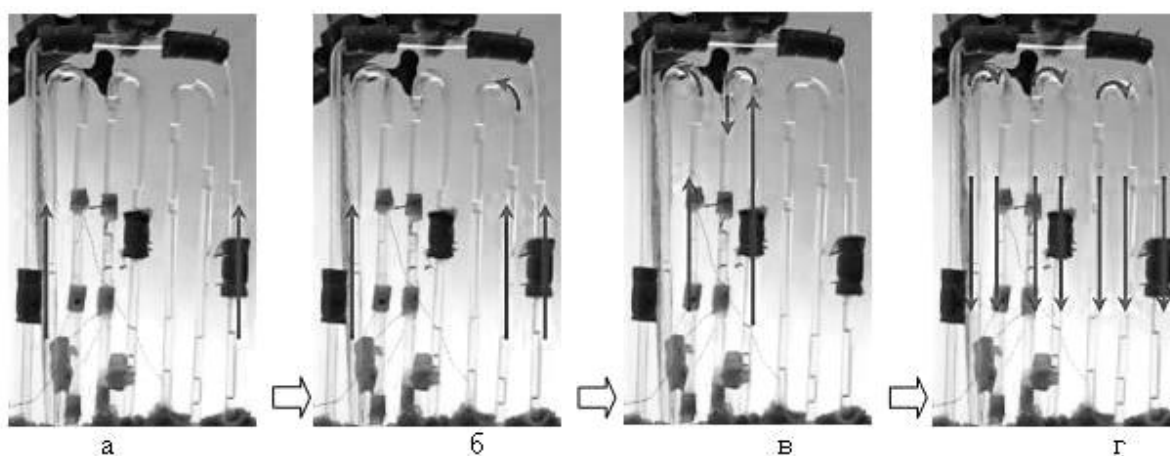


Рис. 3. Направление движения жидкостных снарядов в пусковом режиме

Подъем жидкостных снарядов (см. рис. 3, а - б) обусловлен нагревом и расширением паровых снарядов, оказавшихся в ЗН в момент пуска ПТТ. Причем при различных пусках одной и той же ПТТ это движение начиналось в различных каналах. Это говорит о том, что на данное явление оказывает влияние начальное распределение снарядов. Следует заметить, что подобное движение (см. рис. 3, а - б) наблюдали и авторы [2]. Однако в [2] подъем снарядов происходил одновременно в большинстве каналов ПТТ, что приводило к кратковременному осушению зоны нагрева, чего в данном исследовании не наблюдалось.

Возвратное движение жидкостных снарядов обусловлено двумя факторами. Первый – падение давления в паровых снарядах, выталкивающих жидкостные из ЗН. Оно вызвано конденсацией пара в этих снарядах, связанной с их полным или частичным выходом из ЗН в ЗК. Второй – «пружинящее» действие 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, по окончании которого ПТТ выходила на стационарный режим работы.



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

При стационарной работе ПТТ можно выделить три основных режима работы: термосифонный, пульсационный и пульсационный режим с циркуляцией теплоносителя по замкнутому контуру ПТТ. Термосифонный режим наблюдался при плотностях подведенного теплового потока  $\approx 550 \dots 3800 \text{ Вт/м}^2$  и наступал после пускового режима. В этом режиме ПТТ работала как массив соединенных между собой термосифонов. Для него характерно чередование периодов покоя с периодами колебаний снарядов. 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. Периоды колебаний, напротив, коротки. Они представляли собой быстро затухающие колебания снарядов с большой амплитудой и малой частотой. Следует заметить, что подобные периоды покоя наблюдались и в работе [3], где также исследовались ПТТ, заправленные водой. Однако при использовании метанола [2, 3] или фреона R-123 [4] подобное 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, а также к уменьшению амплитуды колебаний снарядов и увеличению частоты. В определенный момент ( $q \approx 3800 \dots 4700 \text{ Вт/м}^2$ ) периоды покоя исчезали, а колебания снарядов становились постоянными. Таким образом, ПТТ переходила на пульсационный режим работы.

При плотности подведенного теплового потока больше  $4700 \text{ Вт/м}^2$  поток теплоносителя начинал циркулировать по замкнутому контуру ПТТ. На циркуляционное движение потока накладывались продольные колебания снарядов. Такой режим работы ПТТ является пульсационным режимом с циркуляцией. Направление циркуляции (по или против часовой стрелки) переменное. Причем смена направления происходит случайным образом. Циркуляция с переменным направлением наблюдалась также и в [2, 3].

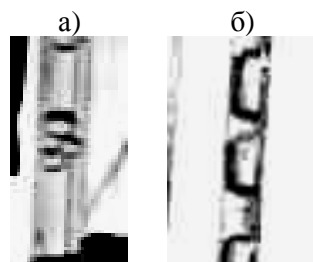


Рис. 5. Картины течения в пульсационной тепловой трубе

При работе ПТТ в пульсационном режиме с циркуляцией и значительных плотностях подведенного теплового потока ( $q > 5300 \text{ Вт/м}^2$ ) скорость движения потока была настолько велика, что он уносил паровые пузырьки, образующиеся на центрах парообразования в ЗН внутри жидкостных снарядов. Это приводило к тому, что поток теплоносителя выходил из зоны нагрева в переходном режиме от снарядного к дисперсному (рис. 5, а). При этом возвращение потока в зону нагрева происходило в снарядном режиме (рис. 5, б), который наблюдался также во всех зонах ПТТ при ее работе в остальных режимах.

На рис. 5: а – переходный режим от снарядного к дисперсному; б – снарядный режим.

Как показывает анализ литературных данных, посвященных визуализации работы ПТТ [2 - 5], дисперсный режим течения наблюдается только при работе ПТТ в кризисном режиме [5]. Поэтому в данном исследовании в целях предотвращения кризиса, могущего повлечь за собой разрушение стеклянных оболочек ПТТ, при переходе от снарядного к дисперсному режиму течения потока опыты прекращались.

Движение снарядов при работе исследуемых ПТТ в горизонтальном положении при  $q \approx 550...650 \text{ Вт/м}^2$  аналогично движению при работе ПТТ в пусковом режиме при вертикальной ориентации. Но в некоторых опытах это движение прерывалось длительными периодами покоя, по окончании которых оно возобновлялось. Наличие периодов покоя при работе ПТТ в горизонтальном положении наблюдалось также и в [4]. Однако в [4] периоды покоя сопровождалась вибрацией снарядов, то есть их колебанием с большой частотой и малой амплитудой. В данном исследовании подобный эффект наблюдался лишь в некоторых отдельных случаях. В большинстве же проведенных опытов во время периодов покоя какие-либо движения или колебания как отдельных снарядов, так и потока в целом отсутствовали.

Для 4-витковой ПТТ движение потока происходило в основном в пределах зоны конденсации, в результате чего массообмен, а также связанный с ним теплообмен между зонами отсутствовал, то есть труба не работала как теплопередающее устройство. А по окончании пускового режима наступало осушение ЗН, о чем свидетельствовал резкий рост температуры в ней, и опыты прекращались.

У 6-витковой ПТТ при работе в горизонтальном положении после пускового режима наступал стационарный термосифонный режим работы, в котором она передавала определенные тепловые потоки. Однако при  $q \approx 1900...2000 \text{ Вт/м}^2$  в ЗН также происходило осушение.

Визуализация работы ПТТ не только дала возможность выделить отдельные режимы работы, но и позволила выявить определенные взаимодействия между снарядами: «пружинящее» действие паровых снарядов, описанное выше; 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. 6).



Рис. 6. Сдавливание парового снаряда: 1 – пар; 2 – жидкость

Следует заметить, что слияние паровых пузырьков с паровыми снарядами происходит не только в случае сдавливания парового снаряда, но и при выходе пузырьков из зоны нагрева. При работе ПТТ в горизонтальном режиме данный процесс происходит несколько иначе. Под действием подъемных сил пузырек движется не вдоль, а поперек канала и останавливается у стенки. Слияние такого пузырька с паровым снарядом происходит лишь в случае его уноса снарядом при движении. В противном же случае пузырек остается у стенки. 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. 7), 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.

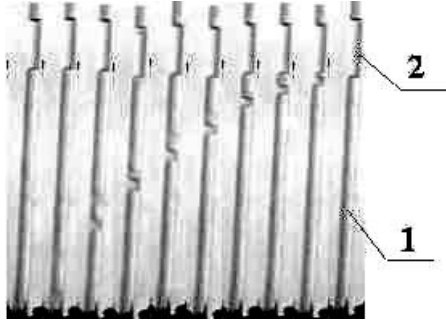


Рис. 7. Объединение снарядов:  
1 – пар; 2 – жидкость

В частности, разрушение жидкостных снарядов происходит в результате расхода жидкости на пленку, остающуюся на внутренней поверхности стенок при прохождении снаряда по каналу ПТТ. В случае вертикальной ориентации ПТТ с нагревом снизу пленка стекает в ЗН под действием сил тяжести. При горизонтальной ориентации действие сил тяжести на пленку жидкости отсутствует, поэтому ее стекание в ЗН не наблюдается, что, возможно, является причиной осушения ЗН. 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.

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. 8). В случае отсутствия колебаний капля стекает в зону нагрева.

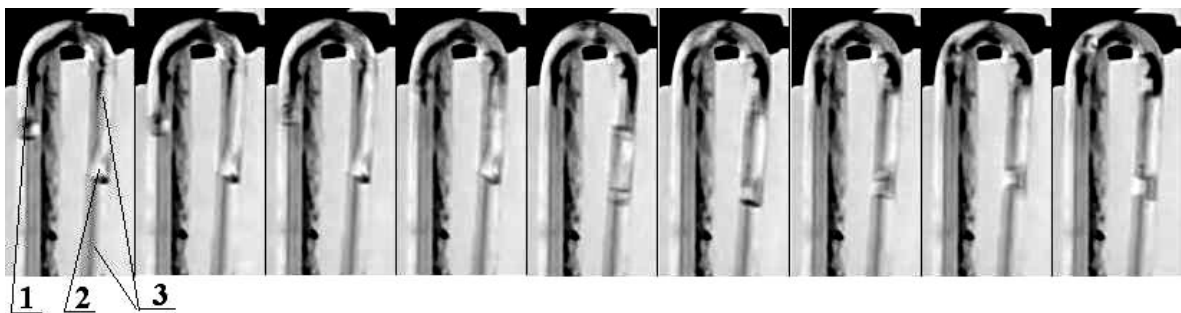


Рис. 8. Образование жидкостного снаряда из пленки жидкости: 1 – снаряд; 2 – капля; 3 – пар

Образование жидкостных снарядов из пленки жидкости наблюдалось также и в [2, 3]. Однако в [2] это явление наблюдалось только в ЗН, а образование снарядов происходило за счет накопления жидкости в U-образном изгибе трубы. Авторы [3] наблюдали явление, похожее на вышеописанное, так же, как и в данном исследовании, вблизи U-образного изгиба трубы в ЗК. При этом они подчеркивают, что данный процесс наблюдается 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.

### Выводы

Визуализация работы 4- и 6-витковых ПТТ внутренним диаметром 3,1 мм, заполненных водой с КЗ ( $50 \pm 5$  %), при их ориентации в горизонтальном и вертикальном положении с нагревом снизу показала, что можно выделить пусковой режим работы, а также три основных стационарных режима: термосифонный, пульсационный, пульсационный с циркуляцией. Движение снарядов в пусковом режиме зависит от их начального распределения по длине ПТТ. При работе в термосифонном режиме основным фактором, влияющим на движение снарядов, являются физические свойства теплоносителя. В пульсационном режиме работы с циркуляцией наблюдаются случайные и не зависящие от геометрических параметров ПТТ, КЗ и физических свойств теплоносителя, смены направления циркуляции.

Передача теплоты ПТТ в горизонтальном положении зависит от количества витков. При небольшом количестве витков (4) ПТТ не работают. С увеличением количества витков (после шести) ПТТ начинают передавать тепловую энергию, однако значительно меньшую по сравнению с вертикальным расположением.

При работе ПТТ наблюдаются следующие взаимодействия между снарядами: «пружинящее» действие паровых снарядов, сдавливание парового снаряда жидкостными, объединение снарядов, образование жидкостных снарядов из пленки жидкости.

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.

## ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ В ПУЛЬСАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ

Є.С. Алексеїк, В.Ю. Кравець

Приведені результати досліджень з візуалізації роботи 4- і 6-виткових замкнених пульсаційних теплових труб при різній орієнтації у просторі. Описані картини та особливості руху потоку теплоносія при роботі труб в основних режимах. Дано опис взаємодій снарядів та їх причин. Виявлено вплив геометричних параметрів пульсаційних теплових труб і фізичних властивостей теплоносіїв на вищевказані процеси.

## VISUALIZATION OF MASS TRANSFER PROCESSES IN PULSATING HEAT PIPES

E. Alexeik, V. Kravetz

The researches on the visualization of the 4-and-6 turns closed pulsating heat pipes operation at the different orientation in space have been resulted. Flow patterns and peculiarities of heat carrier's moving at the tubes work under main modes are described. The contrivances interaction and their reasons are given. Influence of geometrical parameters of pulsating heat pipes and heat carrier physical properties on above mentioned processes have been revealed.

### Список использованных источников

1. Patent #4,921,041 U.S.A., F28D 15/02 Structure of a Heat Pipe / 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 / 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 / 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 / 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 / T. Katpradit, A. Tewata, K. 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 / В.Ю. Кравец, Е.С. Алексеик // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*/ - 2010. – № 6/7. – С. 59 - 63.

Надійшла до редакції 01.02.2013 р.  
Після доопрацювання 21.02.2013 р.

УДК 006.91765.018

## **ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА МОРФОЛОГИИ ИСХОДНЫХ ПОДЛОЖЕК И СТРУКТУР С НЕЗАРОЩЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

**С.В. Бондарец, С.Ю. Быковский, И.И. Марончук, А.Н. Петраш, Д.Д. Санникович**

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

Рассмотрены пути возможности оценки качества морфологии поверхности исходных пластин кремния после химико-механической и химико-динамической полировки методом атомно-силовой микроскопии. Представлены результаты исследования на мультимикроскопе СММ-2000 в режиме атомно-силовой микроскопии структур с незарощенными квантовыми точками, полученных методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки. Установлены размеры квантовых точек при формировании их на подложках с различной ориентацией при одинаковых технологических условиях. Показана необходимость проведения контроля качества поверхности исходных материалов на наноуровне при различных стадиях технологического процесса выращивания квантоворазмерных структур.

### **Введение**

В последнее время наблюдается бурный рост исследований в области, связанной с получением низкоразмерных наноструктур, таких как квантовые точки, в связи с перспективами создания на их основе различных приборов с улучшенными свойствами. Ожидается, что наиболее широкое применение они найдут в солнечной энергетике, в так называемых солнечных батареях 3-го поколения с КПД, превышающим 50 % [1].