

УДК 536.248.2

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-131-136

**СКАЧОК КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ЗАПУСКЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ****А.Н. Шульц**МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
shultsalek@mail.ru

Запуск тепловой трубы (ТТ) из замороженного состояния теплоносителя (натрия) является самым опасным периодом ее работы. В этот момент может наступить прекращение замкнутой циркуляции теплоносителя, перегрев стенки испарителя и ее прожог. Главной причиной является наступление капиллярных ограничений. Из всех видов потерь давления основными считают потери: на прокачку жидкого теплоносителя; при фазовых переходах; на перенос паровой фазы; при этом структура парового потока не исследовалась. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования нестационарных температурных полей при запуске натриевой ТТ. Структуру парового потока изучали при запуске ацетоновой ТТ. Исследование структуры парового потока проводили оптическими методами контроля. Для этого использовали интерферометр Маха — Цендера, теневой прибор Теллера, метод «светового ножа». Обнаружены частицы жидкой фазы, вихревые структуры в испарителе и конденсаторе, конденсационный скачок на выходе из испарителя. Появление частиц жидкой фазы в паровом потоке объясняется гетерогенной объемной конденсацией, наступающей в результате как гетерофазных флуктуаций из самого пара, так и появления зародышей новой фазы в виде капель, выброшенных из фитиля. Скачок конденсации обнаружен на выходе из испарителя в виде каустической линии. Кратковременный перегрев стенки натриевой тепловых труб (ТТ) при запуске ее из замороженного состояния объясняется наступлением капиллярных ограничений в результате возможного появления конденсационного скачка и потерь на вращение вихревых структур в испарителе и конденсаторе.

**Ключевые слова:** гетерофазные, интерферометр, Теллер, вихревые структуры, замороженный**Ссылка для цитирования:** Шульц А.Н. Скачок конденсации при запуске тепловых труб // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-131-136

**З**апуск жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя представляет собой самый ответственный и опасный этап их работы. Вымораживание и прекращение циркуляции жидкого теплоносителя может привести к осушению фитиля испарителя и прожогу стенки. Потеря работоспособности ТТ в этот период может стать причиной выхода из строя всех объектов, обслуживаемых ТТ [1, 2]. В данной работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследований нестационарных температурных полей при запуске жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя (натрия). Для выяснения причин срыва запуска жидкометаллической ТТ структуру парового потока исследовали на ацетоновой плоской ТТ с помощью оптических средств контроля [3–5].

**Экспериментальные стенды и средства контроля****Стенд для изучения пусковой динамики жидкометаллических ТТ**

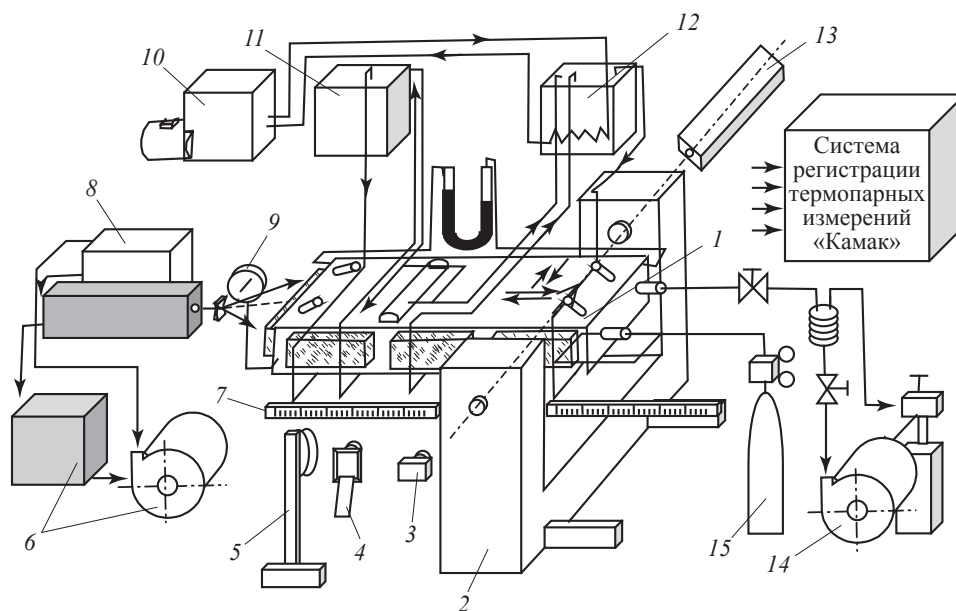
Объектом исследования служили две натриевые тепловые трубы диаметром 48 мм: № 1 — длина 1800 мм с газовым наполнением, давление неконденсируемого газа (НКГ) (аргона)  $P \approx 133$  Па, длина зоны испарения 250 мм; № 2 — вакуумная (без НКГ), длина 1825 мм, длина зоны испарения

278 мм [1–3]. Испытания тепловых труб проводили в вакуумной камере при горизонтальном расположении ТТ. Нагрев зоны испарения осуществляли электронагревателем радиационного типа, обеспечивающим выход ТТ на уровень температуры до 800 °С. Для исключения воздействия нагревателя на зону конденсации ТТ в конце зоны испарения была установлена экранно-вакуумная изоляция из трех слоев ниобиевой фольги.

Отвод тепла от зоны конденсации осуществляли излучением на охлаждаемые водой стенки вакуумной камеры. Обе трубы имели составной фитиль, образованный кольцевым зазором, для протока жидкого теплоносителя под экраном. Экран фитиля был выполнен из нержавеющей сетки саржевого плетения № 120/670 ГОСТ 3187–65. Общими для каждой из этих труб являются следующие параметры: диаметр пор экрана фитиля 120 мкм, кольцевой зазор под экраном для протока теплоносителя 0,5 мм. Материал корпуса — ниобий.

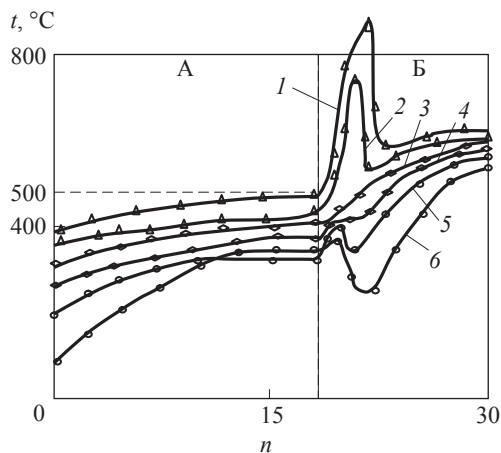
**Система измерений**

Температура стенки ТТ контролировалась вольфрам-рениевыми термомпарами, расположенными на наружной поверхности трубы. Корольки термопар приваривали к стенке трубы и закрывали экраном. Показания термопар автоматически регистрировались информационно-измерительной системой (ИИС) с шагом 1,56 с.



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки по визуализации оптических неоднородностей в паровом потоке тепловых труб: 1 — рабочий участок; 2 — Интерферометр Маха-Цендера; 3 — фотоаппарат; 4 — видеокамера; 5 — скоростной фоторегистратор; 6 — система охлаждения аргонового лазера; 7 — линейка; 8 — аргоновый лазер; 9 — манометр; 10 — насос термостатов; 11, 12 — термостаты; 13 — гелий — неоновый лазер; 14 — вакуумный насос; 15 — газ, аргон (подпитка НТТ неконденсируемым газом);

**Fig. 1.** The schematic diagram of experimental installation to visualize the optical non- uniformity in a steam flow of heat pipes: 1 — a working site; 2 — M-Z (Mach-Zender) Interferometer; 3 — a camera; 4 — a video camera; 5 — a high-speed photo recorder; 6 — a cooling system of the argon laser; 7 — a ruler; 8 — an argon laser; 9 — a manometer; 10 — a Pump of thermostats; 11, 12 — Thermostats; 13 — Helium–neon laser; 14 — a vacuum pump; 15 — gas, argon (feed of a LHP with non-condensed gas)



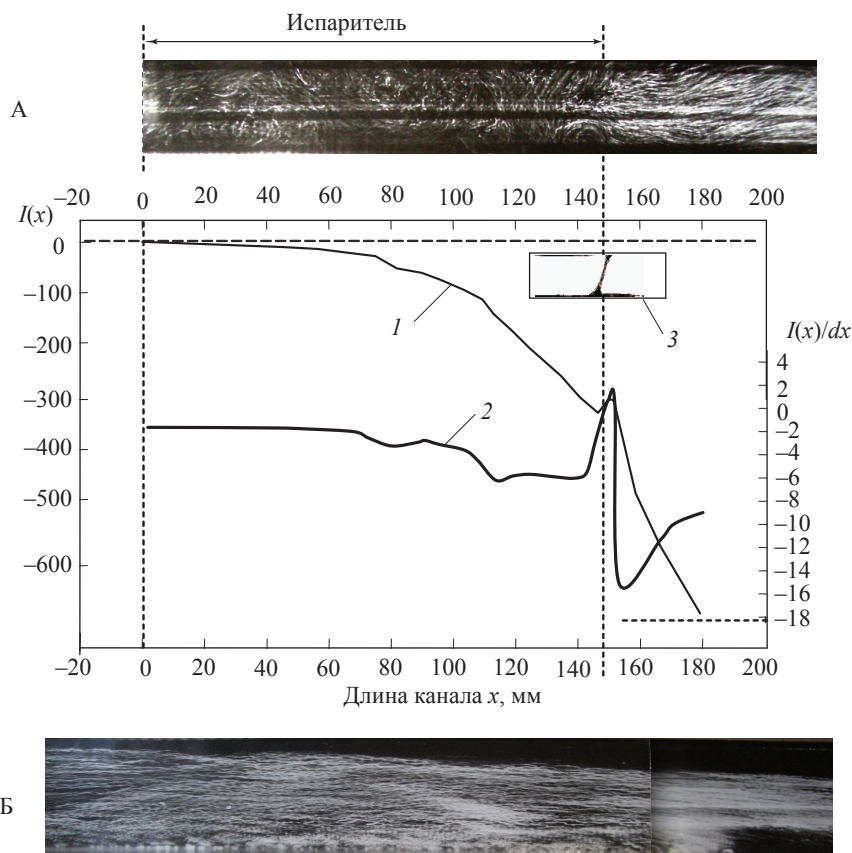
**Рис. 2.** Фрагмент нестационарного температурного поля при переходе натриевой ТТ из стационарного режима в режим большей мощности: 1–3 — номера термопар, расположенных в испарителе; 5, 6 — номера термопар в конденсаторе

**Fig. 2.** A fragment of a non-stationary temperature field upon transition of a sodium HP from the stationary mode: 1–3 — numbers of the thermocouples located in the evaporator; 5, 6 — numbers of thermocouples in the condenser

### Стенд для исследования структуры парового потока

Изучение структуры парового потока в жидкометаллических ТТ сопряжено с непреодолимыми техническими трудностями. Поэтому для исследования оптических неоднородностей в парожидкостном тракте плоской модели ТТ был спроектирован и создан стенд [4] (рис. 1). Рабочий участок — низкотемпературная тепловая труба. Теплоноситель — ацетон. Основным прибором для регистрации оптических неоднородностей — интерферометр Маха — Цендера ИТ-244 производства ЛОМО. Рабочее поле прибора имеет диаметр 70 мм. Компенсационная камера позволит регулировать оптический ход опорного луча. Прибор перестраивали в теневой прибор Теплера: опорный пучок перекрывали, а в фокусе предметного светового пучка устанавливали «нож Фуко».

Подсветку интерферометра проводили источником света ЛГ-52 (0,6328 мкм). Визуализацию методом оптического «светового ножа» осуществляли с помощью источника интенсивного монохроматического света ЛГН 404А, длина волны которого  $\lambda = 0,45 \pm 0,035$  мкм.



**Рис. 3.** Результаты расшифровки интерферограмм: 1 — планиметрическое определение энтальпии  $I(x) = \int S(y)dy$  для различных поперечных плоскостей вдоль зоны испарения ТТ; 2 — градиент изменения энтальпии  $d(I(x))/dx$ ; 3 — снимок скачка конденсации (Теплер); А — фотография потока в испарителе; Б — фотография потока в конденсаторе, второе окно

**Fig. 3.** The results of interferograms interpretation: 1 — planimetric definition of an enthalpy  $I(x) = \int S(y)dy$  of various cross planes along a zone of evaporation of a HP; 2 — gradient of change of an enthalpy of  $d(I(x))/dx$ ; А — the photo of a flow in the evaporator; Б — the photo of a flow in the condenser, the second window

## Результаты исследования запуска жидкометаллической ТТ

В жидкометаллических ТТ границы, создаваемые вихрями, в пределах которых ускоряется сверхзвуковой поток, подобны соплу Лавалья. Ван-Андел [1–3] предположил возможное уменьшение критического сечения в круглой трубе и предложил ввести для расчета звукового предела переносимой мощности коэффициент 0,4. Вопрос о возможности запирания потока в критическом сечении вследствие образования скачка конденсации проанализировал Леви [3]. Из его анализа следует, что скачок конденсации происходит при достижении  $M = 1,25$ , то есть в зоне конденсации, в диапазоне температур 475...650 °С. На рис. 2 представлен срыв работы жидкометаллической ТТ при переходе из стационарного режима, соответствующего электрической мощности нагревателя  $N_A = 840$  Вт, в режим, соответствующий мощности  $N_B = 1700$  Вт;  $P_{\text{нкг}} = 133,3$  Па. Число Маха на выходе из испарителя, оцененное по пе-

репаду давлений, составило 1,4. Нестационарное поле температуры свидетельствует об осушении стенки испарителя, временном прекращении его работы и о восстановлении работоспособности ТТ ( $\tau = n \cdot 31,4$  с, где  $n$  — номер цикла измерений).

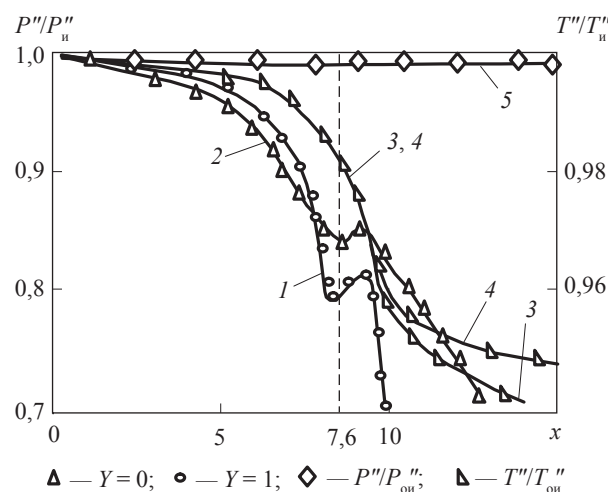
Исследование причины срыва проводили с использованием расчетных оценок по соотношениям из [3–6]. Жидкость, долго находившаяся в контакте с газом, насыщается им. Осушение фитиля происходит из-за вскипания теплоносителя, насыщенного газом в зазоре составного фитиля. Суммарный относительный перегрев жидкости  $\Delta T_{\Sigma} / \Delta T_{\text{кр}} = (\Delta T_{\lambda} + \Delta T_{\Delta p} + \Delta T_{\phi} + \Delta T_{\Gamma}) / \Delta T_{\text{кр}} > 1$ , где  $\Delta T_{\text{кр}} = (dP/dT)^{-1} [(2\sigma / 0,5\delta_{\text{зав}}) - P_{\text{нкг}}]$ . Пар прорывает жидкую пленку в экране фитиля с разбрызгиванием. Выброшенные в паровой поток капли являются зародышами новой фазы и могут способствовать развитию процесса гетерогенной объемной конденсации аналогично тому, как это происходит в низкотемпературной ТТ (рис. 3, А). На перенос капель затрачивается энергия парового потока, и потери давления в паре возрастают.

Следовательно, скачок конденсации является сопутствующим явлением и поддерживает развитие срывного процесса. Показания 5-й и 6-й термопар (см. рис. 2) подтверждают факт выброса капель и их переноса в конденсатор и косвенно дают основания полагать, что в паровом потоке состоялась гетерогенная объемная конденсация.

### Результаты визуализации структуры парового потока

Первое значительное изменение градиентов оптической неоднородности наблюдалось на выходе из испарителя (см. рис. 3, А), [5, 6]. В начале конденсатора наблюдалось интенсивное развитие объемной конденсации (рост размера капель). В конце конденсатора — рост количества и размеров капель и выпадение их из потока на нижнюю плиту (рис. 3, Б).

Теневым методом [7] выявлены области наибольших градиентов оптических неоднородностей.



**Рис. 4.** Распределение параметров влажного пара вдоль нижней ( $y = 0$ ) и верхней ( $y = 1$ ) поверхностей фитиля НТТ: 1, 2 — распределение относительного давления  $P''/P''_{0н}$  по результатам расшифровки интерферограмм (1 —  $y = 1$ , 2 —  $y = 0$ ); 3, 4 — относительная температура  $T''/T''_{0н}$  по результатам термопарных измерений (3 —  $y = 1$ , 4 —  $y = 0$ ); 5 — относительное давление  $P''/P''_{0н}$  расчет по модели идеального газа; пунктиром показан выход из испарителя ( $x = 7,6$ )

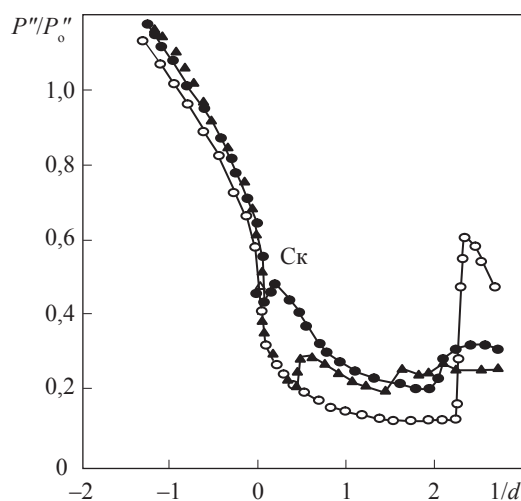
**Fig. 4.** The distribution of parameters of wet vapor along the lower ( $y = 0$ ) and the top ( $y = 1$ ) of surfaces of a LHP wick: 1, 2 — the distribution of relative pressure  $P''/P''_{0н}$  by results of interpretation of interferograms (1 —  $y = 1$ , 2 —  $y = 0$ ); 3, 4 — the relative temperature of  $T''/T''_{0н}$  by results of thermopair measurements (3 —  $y = 1$ , 4 —  $y = 0$ ); 5 — the relative pressure  $P''/P''_{0н}$  calculation for an ideal gas model; the evaporator outlet is shown by a dotted line  $x = 7,6$

При медленном пуске в ТТ формируется ядро потока на оси парожидкостного тракта, которое в процессе пуска движется из испарителя в конденсатор и достигает его торца. Области вдува-отсоса визуализируются в виде узких зон вдоль фитилей испарителя и конденсатора. При быстром запуске ТТ наблюдается скачок конденсации на выходе из испарителя (рис. 3 и 4). Следует заметить, что основание скачка сдвинуто в сторону испарителя, где интерферограмма показывает повышенную влажность.

Подобная картина наблюдается и в интерферометре. В этом же месте возникает яркая каустическая линия, из которой как из источника выходят интерференционные линии в сторону испарителя и конденсатора. В завершающей стадии пуска изображение интерферограммы стабилизируется и принимает такой же вид, как при стационарном режиме (см. рис. 3, Б).

На рис. 4. показано распределение параметров влажного пара; теплоноситель — ацетон; режим:  $Q = 230$  Вт.

В энергетических силовых установках основной причиной возникновения скачков конденсации является переохлаждение сверхзвукового парового потока. Эти процессы достаточно хорошо изучены [8].



**Рис. 5.** Изменение относительного давления в сверхзвуковом потоке водяного пара [8]:  $1/d = 0$  — срез сопла Лавала; Ск — скачки конденсации;  $\circ$  — перегретый пар на оси;  $\bullet$  — влажный пар на оси,  $\epsilon = 3\%$  ( $\epsilon$  — степень влажности);  $\blacktriangle$  — влажный пар на оси,  $\epsilon = 14\%$

**Fig. 5.** The change of relative pressure in a supersonic flow of water vapor [8]  $1/d = 0$  — The Laval nozzle cut; CSW — condensation shock waves;  $\circ$  — superheated steam on an axis;  $\bullet$  — wet vapor on an axis,  $\epsilon = 3\%$ ;  $\epsilon$  — humidity degree;  $\blacktriangle$  — wet vapor on an axis,  $\epsilon = 14\%$



В ТТ предыстория возникновения скачка конденсации иная. В испарителе пар пересыщен процессом вдува и обогащен капельками жидкой фазы. Перед входом в зону конденсации паровой поток обжимается вихрями в виде поперечных валов.

Возникает конфузorno-диффузорное течение дозвукового потока в низкотемпературных ТТ. Такое воздействие увеличивает концентрацию капель, а значит, пересыщение и влажность возрастают по ходу потока. На выходе из испарителя изменяется знак расходного воздействия, что создает необходимую степень пересыщения для развития конденсационного скачка.

Внешнее сходство распределения давления в дозвуковом (см. рис. 4) и в сверхзвуковом (рис. 5) потоках обусловлено стоком вектора  $\rho u$  в разреженную область гетерогенной объемной конденсации (см. рис. 3, Б). В данном случае объемная конденсация происходила без образования каустической линии. Это означает, что необходимая степень метастабильности для явления «тиндалевского рассеяния» в стационарном режиме не была достигнута.

## Выводы

Скачок конденсации в ТТ происходит при высокой влажности парового потока и при низких числах  $Re$ . Вдув пара в испарителе создает вихревые структуры в виде поперечных валов, в конденсаторе — в виде продольных. Вращение таких структур создает дополнительное переохлаждение пара и вызывает пересыщение пара, достаточное для возникновения гетерогенной объемной конденсации как на зародышах, самообразовавшихся в результате гетерофазных флуктуаций, так и на каплях, выброшенных из фитиля. На границе смены воздействия (испаритель — конденсатор) обнаружена устойчивая вихревая структура в виде поперечных валов, вращающихся по направлению вдув — отсос. Наличие такой структуры на выходе из испарителя уменьшает проходное сечение и создает дополнительное гидравлическое сопротивление. Таким образом, предположение Леви нашло экспериментальное подтверждение в данной работе.

При этом сопротивление в паре растет и возможно наступление капиллярных ограничений [9, 10]. Изменение энтальпии по ходу парового

потока (кривая 1) и ее градиент (кривая 2) на рис. 3 подтверждают факт возникновения скачка конденсации. Известно сильное влияние электрических полей и радиации на процессы зародышеобразования из паров теплоносителя в результате гетерофазных флуктуаций. Однажды возникнув, эти зародыши будут длительное время поддерживать высокую влажность и создавать благоприятные условия для гомогенно-гетерогенной объемной конденсации. Однако этот сценарий маловероятен для данной установки, так как, приняты меры по экранизации и заземлению рабочего участка.

## Список литературы

- [1] Шульц А.Н., Быстров П.И., Гончаров В.Ф., Харченко В.Н. Исследование нестационарного тепло- и массообмена в жидкометаллических тепловых трубах // Матер. VI Всесоюз. конф. по теплообмену. Минск: ИТМО АН БССР, 1980. Т. IV. С. 94–99.
- [2] Шульц А.Н. Восстановление работоспособности тепловой трубы // Электроника и счетно-решающая техника в лесной и деревообрабатывающей промышленности: науч. тр. МЛТИ. М.: МЛТИ, 1980. № 129. С. 173–176.
- [3] Шульц А.Н. Перенос тепла, массы и импульса в испарительно-конденсационных теплообменниках. Дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14: защищена 22.12.2006. М., 2006. С. 233–246.
- [4] Шульц А.Н. Выбор оптических методов исследования течений неравновесного парового потока // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 135–140.
- [5] Шульц А.Н. Оптические неоднородности в неравновесном потоке тепловых труб // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 140–149.
- [6] Шульц А.Н., Данилов С.А., Ивлотин А.И. Влияние объемной конденсации на теплообмен в низкотемпературной тепловой трубе при наличии неконденсируемого газа // Тр. Второй Всесоюз. конф. «Теплофизика и гидрогазодинамика процессов испарения и конденсации». Рига, 1988. Т. II. С. 10–11.
- [7] Шульц А.Н. Экспериментальный стенд для исследования оптических неоднородностей в неравновесном паровом потоке тепловых труб // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 3 (45). С. 203–206.
- [8] Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.
- [9] Шульц А.Н. Определение энтальпии неравновесного парового потока // Тр. Рос. Нац. конф. по теплообмену (РНКТ-4); Москва. 23–27 октября 2006. М., 2006. Т.5. С. 329–332.
- [10] Шульц А.Н. Потери энергии в паровом потоке тепловых труб // Сб. науч. тр. докторантов и аспирантов. М.: МГУЛ, 2006. Вып. 334 (7). С. 24–26.

## Сведения об авторах

**Шульц Александр Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: shultsalek@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.12.2016 г.

## CONDENSATION SHOCK AT THE START-UP OF HEAT PIPES

A.N. Schults

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

shultsalek@mail.ru

The start-up of heat pipes (HP) after the frozen state of the heat carrier (sodium) is the most dangerous period of their operation. At this moment there can occur the heat carrier closed circulation cut-off, an overheat of the evaporator wall and its burn-through. The capillary restrictions are the main reason for the above facts. Among all types of pressure losses the main ones are considered to be as follows: losses caused by pumping the liquid heat carrier; losses upon phase transitions; pressure losses upon a steam phase transfer. At the same time the structure of a steam flow has not been investigated yet. In this paper the results of the pilot study of non-stationary temperature fields at a start-up of a sodium HP are presented. The structure of a steam flow has been studied at a start-up of an acetonic HP. The research of a steam flow structure was carried on by optical control methods. The M-Z (Mach-Zender) interferometer, the Toepler shadow ("schlieren") technique and a laser light sheet method were used to carry out the research. To the purpose, some particles of a liquid phase, vortex structures in the evaporator and the condenser, a condensation shock at the evaporator outlet have been found. Some liquid phase particles available in a steam flow can be explained by the heterogeneous volume condensation occurring as a result of both heterophase fluctuations from the steam and the birth of germs of a new phase in the form of drops which have been thrown out from a wick. The condensation shock in the form of a focal curve was found at the evaporator outlet. The short-term overheat of a sodium HP wall at its start-up after the frozen state is explained by certain capillary restrictions as a result of a possible condensation shock and that of some losses resulting from vortex structure rotation in the evaporator and the condenser.

**Keywords:** heterophase, the interferometer, Toepler, vortex structures frozen

**Suggested citation:** Schults A.N. *Skachok kondensatsii pri zapuske teplovykh trub* [Condensation shock at the start-up of heat pipes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-131-136

### References

- [1] Schults A.N., Bystrov P.I., Goncharov V.F., Harchenko V.N. *Issledovanie nestacionarnogo teplo- i massoobmena v zhidkometallicheskih teplovykh trubah* [Investigation of non-stationary heat and mass exchange in the liquid-metal thermal pipes]. *Teplo- i massoobmen—VI: Materialy VI vsesoyuznoy konferencii po teplomasoobmenu*. Minsk: ITMO AN BSSR, 1980, T. IV, pp. 94–99. (in Russian)
- [2] Shults A.N. *Vosstanovlenie rabotosposobnosti teplovykh trub* [Maintenance of a thermal pipe] *Elektronika i schetno-reshayushchaya tekhnika v lesnoy i derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti*. Nauchnye trudy MLTI. Moscow: MLTI, 1980, vol. 129, pp. 173–176. (in Russian)
- [3] Shults A.N. *Perenos tepla, massy i impul'sa v isparitel'no-kondensatsionnykh teploobmennikakh* [Transfer of heat, weight and an impulse in vaporizing and condensation heat exchangers]. Dr. tech. sci. diss. 01.04.14. Moscow: 2006, 272 p, pp. 233–246. (in Russian)
- [4] Shults A.N. *Iybor opticheskikh metodov issledovaniya techeniy neravnovesnogo parovogo potoka* [Choice of optical methods of a research of currents of a nonequilibrium steam stream] *Moscow State Forest University Bulletin — Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 6 (48), pp. 135–140. (in Russian)
- [5] Shults A.N. *Opticheskie neodnorodnosti v neravnovesnom potoke teplovykh trub* [Optical heterogeneity in a nonequilibrium stream of thermal pipes] *Moscow State Forest University Bulletin — Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 6 (48), pp. 140–149. (in Russian)
- [6] Shults A.N., Danilov S.A., Ivlyutin A.I. *Vliyanie ob'emnoy kondensatsii na teplomasoobmen v nizkotemperaturnoy teplovykh trubakh pri nalichii nekondensirovannogo gaza* [Influence of volume condensation on heat and mass exchange in a low-temperature thermal pipe in the presence of not condensed gas]. *Trudy II vsesoyuznoy konferencii «Teplofizika i gidrogazodinamika processov isparenii i kondensatsii»*, Riga: 1988, T. II, pp. 10–11. (in Russian)
- [7] Shults A.N. *Yeksperimental'nyy stend dlya issledovaniya opticheskikh neodnorodnostey v neravnovesnom parovom potoke teplovykh trub* [The experimental stand for a research of optical not uniformity in a nonequilibrium steam stream of thermal pipes]. *Moscow State Forest University Bulletin — Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 3 (45), pp. 203–206. (in Russian)
- [8] Deych M.E., Filippov G.A. *Gazodinamika dvufaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow: Yenergoizdat: 1981, 472 p. (in Russian)
- [9] Shults A.N. *Opreделение entalpii neravnovesnogo parovogo potoka* [Definition of an enthalpy of a nonequilibrium steam stream] *Trudy RNKT-4*; 23–27 oktyabrya 2006. Moscow: 2006, t. 5, pp. 329–332. (in Russian)
- [10] Shults A.N. *Poteri yenerгии v parovom potoke teplovykh trub* [Losses of energy in a steam stream of thermal pipes]. *Sb. nauch. tr. doktorantov i aspirantov*. Moscow: MGUL, vol. 334 (7), 2006, pp. 24–26. (in Russian)

### Author's information

**Schulz Alexander Nikolaevich** — Dr. Sci. (Tech.), Prof. of Department of physics of FN-4, BMSTU, e-mail: shultsalek@mail.ru

Received 13.12.2016