

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ 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

Предлагается новый подход к проектированию тепловых труб (ТТ), основанный на опыте, приобретенном в результате экспериментального и теоретического исследования механизмов переноса теплоты, массы и импульса в ТТ. Современный подход к проектированию и расчету максимально достижимого теплопереноса в тепловых трубах (ТТ) построен на упрощенных моделях, не учитывающих процессы гетерогенно-гомогенной объемной конденсации в паровом потоке, возникновение вихревых структур в результате процессов вдува-отсоса, гидравлические потери на трение при встречном движении пара и жидкости на межфазной границе. Движение двухфазной смеси, происходящее в поле аэродинамических и гравитационных сил, приводит к неравномерному расходу конденсированной фазы на теплообменную поверхность фитиля. Обоснован термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса на основе понятия эксергии (часть теплоты, которую можно использовать для получения механической работы). Предлагается изменить схему парожидкостного тракта для получения холодильного эффекта. В то же время эти предложения не исчерпывают всех возможностей построения новых принципиальных схем ТТ. Известны контурные ТТ, которые успешно справляются с теплопереносом при небольших тепловых потоках. При решении вопроса о создании устройств, способных передавать большие тепловые потоки при высоких удельных тепловых нагрузках, следует учитывать механизмы теплопереноса в парожидкостном тракте. Последовательный и более полный учет всех механизмов теплопереноса лежит в основе построения новых высокоэффективных ТТ.

**Ключевые слова:** двухфазный, гетерофазные флуктуации, межфазная граница

**Ссылка для цитирования:** Шульц А.Н. Новые подходы к проектированию тепловых труб // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 80–85. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-80-85

Максимально достижимый теплоперенос в тепловых трубах (ТТ) рассчитывается по упрощенным моделям, не учитывающим процессы гетерогенно-гомогенной объемной конденсации в паровом потоке. Недостаточно изучено влияние процессов вдува-отсоса на гидродинамику течения влажного пара, влияние неконденсируемых газов (НКГ) на гидродинамику и теплообмен в торце конденсатора. Практически отсутствуют работы по исследованию процессов запуска ТТ из замороженного состояния теплоносителя. Большинство экспериментальных работ по исследованию теплопереноса в ТТ основано на применении термодинамических измерений температуры стенок зон теплообмена, что значительно ограничивает объем полученной информации [1, 2].

Основным видом потерь давления в пусковой период работы ТТ являются потери давления в паре. При достижении максимального теплопереноса эти потери могут составлять половину капиллярного напора, создаваемого фитилем. Для изучения механизмов тепло- и массообмена в ТТ разработана методика экспериментального исследования структуры парового потока с помощью оптических средств контроля на основе следующих приборов: интерферометра Маха — Цендера, теневого прибора Теплера, лазерного оптического светового ножа. С помощью данной методики выявлены механизмы переноса теплоты, массы и импульса в плоском канале низко-

температурной ТТ. Основные результаты проведенных экспериментов опубликованы в [1–5]. Показано, что увеличение удельных тепловых нагрузок усиливает роль процессов объемной конденсации в теплопереносе, а процессы вдува-отсоса создают устойчивые вихревые структуры в зонах испарения и конденсации. Основной перенос массы и импульса парокapпельного потока происходит в пределах границ возникающих вихревых структур. Движение капель в поле аэродинамических и гравитационных сил, приводит к неравномерному расходу конденсированной фазы на теплообменные поверхности конденсатора. В [6] обоснован термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса на основе понятия эксергии (часть теплоты, которую можно использовать для получения механической работы). В [4–6] предлагается изменить схему парожидкостного тракта для получения холодильного эффекта. Последовательный и более полный учет всех механизмов теплопереноса в ТТ лежит в основе построения новых высокоэффективных устройств для утилизации низкопотенциального тепла.

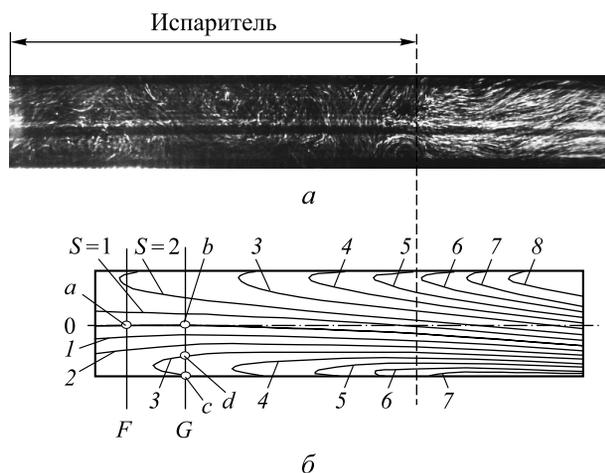
### Механизмы теплопереноса, не учитываемые в расчетных моделях

*Гидродинамика парового потока.* Интерференграмма течения пара в плоской низкотемпературной ТТ (ацетон) показали распределение плотности и степени пересыщения пара в попе-

речных сечениях, теневым методом выявлено ядро потока, с помощью фотографий обнаружены капли и их треки [1, 2]. Изучение треков капель в испарителе (при  $q_w \approx 1$  Вт/см<sup>2</sup>) выявило существование устойчивых поперечных вихрей (z-валы) с размерами  $\sim 1/3$  поперечного сечения канала. Визуализировано синусоидальное движение ядра потока вдоль испарителя в пределах границ вихревых структур. В конденсаторе обнаружены продольные вихри (X-валы). В торце конденсатора наблюдается обширная зона крупномасштабного вихревого течения, вдоль границ которой происходит основной массоперенос. По мере уменьшения скорости ядра потока по трекам капель прослеживается падение капель на нижнюю теплообменную поверхность конденсатора.

**Структура парового потока.** В большинстве работ принимается модель равновесного парового потока, замороженного по отношению к фазовым переходам. Реальная картина не подтверждается экспериментом. Интерферограммы позволили выяснить распределение степени пересыщения пара (рис. 1) в поперечных сечениях плоской ТТ [3].

Методом светового ножа выявлено наличие жидкой фазы в потоке. По количеству и размеру капель оценивали сухость пара  $x_0$  и влажность  $(1 - x_0)$ . Формировалось ядро потока, на



**Рис. 1.** Течение пара в плоской низкотемпературной ТТ: а — фотография двухфазного потока в испарителе и конденсаторе (получена методом светового ножа); б — интерференционные линии в зоне испарения ТТ (настройка интерферометра Маха — Цендера на полосу бесконечной ширины, разности фаз  $S = 0, 1, \dots, 8$ , режим  $Q = 230$  Вт,  $Re = 460$ ,  $Re_r = 30$ , теплоноситель — ацетон)

**Fig. 1.** The flow of vapor in a flat low-temperature TT: а — a photograph of a two-phase flow in an evaporator and a condenser (obtained by the light sheet method); б — interference lines in the evaporation zone of the TT (adjustment of the Mach-Zehnder interferometer to an infinite-width strip, phase difference  $S = 0, 1, \dots, 8$ , mode  $Q = 230$  W,  $Re = 460$ ,  $Re_r = 30$ , heat transfer agent is acetone)

оси которого влажность и степень пересыщения  $\chi = P/P_s$  возрастали по ходу потока.

Большую роль в организации готовых ядер конденсации играют процессы испарения. Повышение удельной тепловой нагрузки в испарителе может привести к термокапиллярной и барокапиллярной неустойчивости межфазной поверхности и выбросу капель из мениска пор фитиля.

Существенное различие удельных тепловых потоков на верхней и нижней поверхностях теплообмена подтверждено измерениями теплового баланса в установке [2].

### Физические механизмы интенсификации теплопереноса

**Взаимодействие струй на межфазной границе.** Встречное движение пара и жидкого теплоносителя в ТТ и термосифонах (ТС) традиционного исполнения вызывает касательные напряжения на межфазной границе, направленные против потока жидкости. Данное явление затягивает запуск ТТ, а в некоторых случаях приводит и к его срыву. Согласно [6, 7], с увеличением тепловой нагрузки обратный расход жидкости в открытых капиллярах может в пять раз превышать прямой. Следовательно, изменение знака касательных напряжений повышает расход жидкого теплоносителя в шесть раз.

Кроме того, образование капиллярных волн на открытой межфазной поверхности при достижении критерия Вебера ( $We = \rho_n v_n^2 \lambda / 2\pi\sigma > 1$ ) приводит к уносу жидкости в паровой поток и паразитной рециркуляции теплоносителя. Перестройка парожидкостного тракта с целью организации спутных струй пара и жидкости исключает эту проблему.

**Термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса.** Максимально достижимый теплоперенос в ТТ ограничен капиллярными силами фитиля, покрывающими все виды потерь давления в парожидкостном тракте. Можно создать механический насос, дополнительный к капиллярному, работающему за счет внешнего теплоподвода. В [6] изложен метод интенсификации теплопереноса за счет использования эксергетических ресурсов парового потока. Суть метода заключается в создании циркуляционного контура в ТТ, преобразующего часть теплосодержания пара в кинетическую энергию парового потока, которая затем преобразуется в кинетическую энергию жидкости, движущейся к испарителю.

Определенная таким образом работа  $\delta A$  может быть использована для оценки подъема жидкости на высоту  $h_z$ , так как  $\delta A = m_{жс} g h_z$ . Капиллярный потенциал  $P_k = \rho_{жс} g h_{к.} = 2\sigma \cos \alpha / R_{зф}$ . Так как в ТТ циркулирует одна и та же масса, отношение

эксергетического потенциала  $gh_3$  к капиллярному  $gh_k$  найдем из уравнения

$$\frac{h_3}{h_k} = \frac{k_{п}RT_{и}R_{эф}P_{ж}\eta_3}{(k_{п}-1)\mu 2\sigma \cos\alpha} \left[ \left( \frac{P_k}{P_{и}} \right)^{\frac{k_{п}-1}{k_{п}}} - 1 \right], \quad (1)$$

где  $\eta_3 = \Delta T_{и} / T_{и} \leq 0,1$  — эксергетический коэффициент полезного действия (КПД).

При запуске жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя расчетные оценки по формуле (1) показывают, что  $h_3/h_k > 1$ . Данное обстоятельство объясняет причину срыва запуска, осушение испарителя и значительный перегрев стенок. Для ТТ с низкотемпературными теплоносителями при работе вблизи капиллярных ограничений  $h_3/h_k \geq 1$ .

Механизм преобразования энергии пара в кинетическую энергию жидкости основан на влиянии расхода теплоносителя в касательных напряжениях на открытых капиллярных канавках. Данное явление можно оценить критерием Вебера:

$$We = \frac{\rho_n v^2 \lambda}{2\pi\sigma} = \frac{(1 - \xi) \cdot 0,5 \Delta P_{кап} \lambda}{2\pi\sigma},$$

где  $\xi$  учитывает потери давления в паре на трение. Длину капиллярной волны  $\lambda$  выбирают равной  $4d_{пор}$ , согласно экспериментальным данным [3]. Оптимизация параметров ТТ по условию  $0,5 \Delta P_{кап} = \Delta P_{п}$  обеспечивает  $We > 1$  при значениях  $\xi \leq 0,7$ .

Из [3, 6] следует, что эксергетические ресурсы в ТТ достаточны для работы механического насоса, компенсирующего потери капиллярного напора в конденсаторе. Для точной оценки требуется экспериментальное определение КПД такого насоса.

**Влияние полей массовых сил.** Вращение вокруг оси создает поле центробежных сил, которое при соответствующем профилировании канала вызывает появление центробежного ускорения  $\omega^2 R$ , компенсирующего гравитационное. При вертикальном расположении оси ТТ можно полностью скомпенсировать гравитационные силы по условию  $g \cos \alpha = \omega^2 R \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона стенки к оси. При горизонтальном положении вращение ТТ вызывает появление массовых сил, создающих дополнительный к капиллярному движущий перепад давления. Экспериментальные исследования влияния вращения ТТ на теплообмен выявили увеличение коэффициентов испарения и конденсации. Появляется сепарационный эффект, способствующий удалению капель жидкой фазы из парового потока и равномерному расходу конденсированной фазы на теплообменные поверхности конденсатора. Уменьшается гидростатический перегрев

теплоносителя, облегчается его дегазация. Кроме того, интенсифицируется внешний теплообмен на оребренных поверхностях испарителя и конденсатора.

**Фазовые переходы в электрическом поле.** В переохлажденном паре в результате флуктуаций постоянно происходит образование комплексов различных размеров  $r$  из нескольких молекул и их испарение. Если в результате электрического разряда комплекс поглотит электрон, то он скачкообразно переходит в новое качество. Скорость зародышеобразования из таких комплексов гораздо выше, чем у незаряженных ядер конденсации. Они быстрее достигают размеров больше критических ( $r > r_{кр}$ ), растут по ходу потока и способствуют возникновению гомогенной объемной конденсации при относительно небольших степенях пересыщения. Данное явление целесообразно использовать для интенсификации процесса конденсации пара в конденсаторе вращающихся ТТ.

### Бинарные смеси для получения новых теплофизических свойств ТТ

Бинарные смеси, состоящие из хладагента и абсорбента, позволяют получить холодильный эффект в ТТ [8–10]. Хладагентом может быть аммиак, метиламин, вода; соответствующим абсорбентом — вода, хлористый литий, бромистый литий.

Новые теплофизические свойства ТТ можно получить на основе: 1) пароструйной холодильной машины [5]; 2) абсорбционной холодильной машины непрерывного действия (рис. 2).

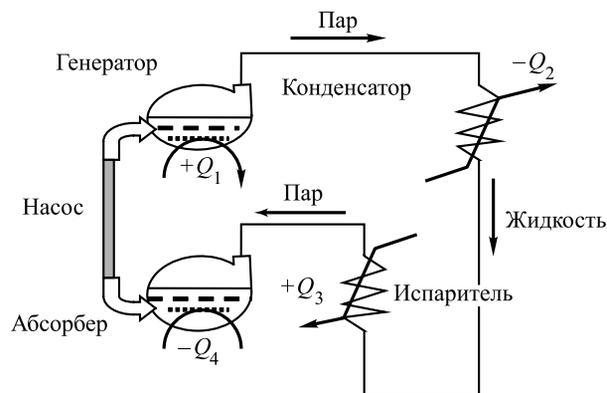
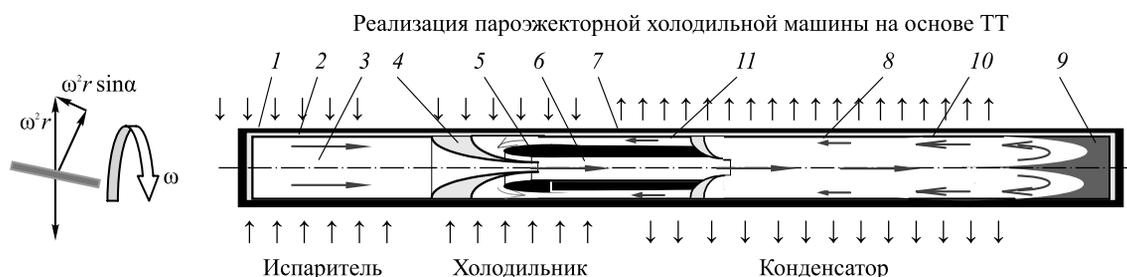


Рис. 2. Принципиальная схема термодинамического расчета абсорбционной холодильной ТТ

Fig. 2. Schematic diagram of thermodynamic calculation of absorption refrigeration TT

Энергетически более выгоден второй вариант. Бинарные смеси для таких машин имеют следующие особенности: 1) при кипении раствора пары состоят главным образом из легкокипящего агента; 2) теплый жидкий раствор абсорбирует



**Рис. 3.** Принципиальная схема модифицированной тепловой трубы с холодильным эффектом: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — сопло эжектора; 5 — осесимметричная вставка; 6 — камера смешения; 7 — конденсатор; 8 — сопловой аппарат инжектора; 9 — диффузор; 10 — капиллярные канавки специальной формы; 11 — холодильная камера;  $\omega = 2\pi n / 60$ ;  $\alpha$  — угол между осью ТТ и поверхностью фитиля;  $\uparrow\downarrow$  — направление движения пара

**Fig. 3.** Schematic diagram of a modified heat pipe with a cooling effect: 1 — housing; 2 — wick; 3 — evaporator; 4 — ejector nozzle; 5 — axisymmetric inset; 6 — mixing chamber; 7 — the condenser; 8 — injector nozzle; 9 — diffuser; 10 — capillary grooves of special shape; 11 — the refrigerating chamber;  $\omega = 2\pi n / 60$ ;  $\alpha$  — angle between the TT axis and the surface of the wick;  $\uparrow\downarrow$  — the direction of steam

пары легкокипящего агента с более низкой температурой при том же давлении.

Термодинамическое равновесие растворов вытекает из первого закона Коновалова, согласно которому при постоянной температуре раствора давление пара увеличивается с возрастанием концентрации того компонента, который содержится в большем количестве в паровой фазе.

По своей теплофизической природе ТТ идеально подходит для данного решения. Роль насоса жидкой фазы в этом случае выполняют:

- капиллярные силы фитиля;
- эксергетические ресурсы парового потока;
- массовые силы от гравитационного поля и поля центробежных сил.

### Утилизация низкопотенциальных тепловых ресурсов. Выводы

Все известные к настоящему времени низкопотенциальные тепловые ресурсы (ТР) можно представить как совокупность тепловых ресурсов естественной среды и ноосферы [5]. Из них следует выделить суммарный охлаждающий импульс атмосферного воздуха и ТР выхлопных газов автомобильного транспорта.

Концепция построения новых принципиальных схем устройств для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов заключается в выполнении следующих условий:

- 1) организация спутных струй пара и жидкого теплоносителя во всех зонах теплообмена;
- 2) использование эксергетических ресурсов парового потока в конденсаторе для преобразования кинетической энергии пара в дополнительный к капиллярному движущий перепад давления в жидкости за счет влияния касательных напряжений на межфазной поверхности в открытых капиллярных канавках;

3) использование полей массовых сил от гравитации и от вращения устройства вокруг оси для получения дополнительного к капиллярному движущего перепада давления в жидкости;

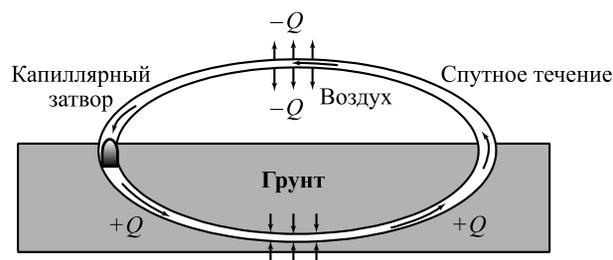
4) введение в паровой тракт бинарных смесей для получения цикла абсорбционной холодильной машины;

5) использование влияния электрических полей на интенсификацию процессов тепло- и массообмена в конденсаторе;

6) применение конструкции фитиля по принципу обратно-менискового испарения.

На рис. 3 представлен вариант холодильной машины, исполненной в горизонтальном расположении. При вертикальном исполнении холодильная машина хорошо вписывается в конструкцию автомобильного рефрижератора. Утилизация выхлопных газов автомобиля происходит при нижнем расположении испарителя, сброс тепла в конденсаторе — при его размещении над крышей теплоизолированной камеры холодильника. Это позволяет охлаждать продукты в камере рефрижератора.

На рис. 4 представлен вариант термосифона для замораживания грунта. Гидрозатвор рассчи-



**Рис. 4.** Термосифон для замораживания грунта со спутным течением пара и жидкости

**Fig. 4.** Thermosyphon for freezing the soil with a tangential flow of vapor and liquid

тывается по оптимальным параметрам с целью создания гидростатического давления, дополнительного к капиллярному:  $\Delta P = \rho_{\text{ж}} g h(y)$ , где  $0 < h < h_{\text{max}}$ . Такие устройства позволяют утилизировать охлаждающий импульс атмосферного воздуха для замораживания грунта с целью увеличения прочности фундаментных оснований мостов, дорог, зданий и других объектов.

### Список литературы

- [1] Шульц А.Н., Быстров П.И., Гончаров В.Ф., Харченко В.Н. Исследование нестационарного тепло- и массообмена в жидкометаллических тепловых трубах // Тепло-массообмен—VI: Матер. VI Всесоюз. конф. по тепло-массообмену. Минск, 26–29 июля 1980 г. Минск: ИТМО АН БССР, 1980. Т. IV. С. 94–99.
- [2] Шульц А.Н. Перенос тепла, массы и импульса в испарительно-конденсационных теплообменниках: Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2006. 220 с.
- [3] Шульц А.Н. Выбор оптических методов исследования течений неравновесного парового потока // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 135–140.
- [4] Шульц А.Н. Оптические неоднородности в неравновесном потоке тепловых труб // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 140–149.
- [5] Шульц А.Н., Данилов С.А., Ивлиутин А.И. Влияние объемной конденсации на тепломассообмен в низкотемпературной тепловой трубе при наличии неконденсируемого газа // Тр. II Всесоюз. конф. «Теплофизика и гидрогазодинамика процессов испарения и конденсации». Рига, 26–28 декабря 1988 г. Рига: РПИ, 1988. Т. II. С. 10–11.
- [6] Shults A.N., Kharchenko V.N. Exergetic approach to the problem of heat transfer intensification in heat pipes // 8th Int. Conf. Heat Pipe (Beijing, 14–18 September 1992), China. Препринт.
- [7] Шульц А.Н., Харченко В.Н. Интенсификация теплопереноса в элементах силовой оптики на основе тепловых труб // Вопросы гидродинамики и теплопередачи в технологических процессах: Науч. тр. МЛТИ. М.: МЛТИ, 1993. Вып. 259. С. 36–48.
- [8] Шульц А.Н. Определение энтальпии неравновесного парового потока // Тр. 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Москва, 23–27 октября 2006 г. М.: МЭИ, 2006. Т. 5. С. 329–332.
- [9] Шульц А.Н. Потери энергии в паровом потоке тепловых труб // Сб. науч. тр. докторантов и аспирантов МГУЛ, 2006. Вып. 334 (7). С. 24–26.
- [10] Шульц А.Н. Модифицированная тепловая труба для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов // Сб. науч. тр. докторантов и аспирантов МГУЛ, 2006. Вып. 334 (7). С. 10–12.

### Сведения об авторе

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

Статья поступила в редакцию 21.06.2017 г.

## NEW APPROACHES TO DESIGN OF HEAT PIPES

A.N. Shults

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

shultsalek@mail.ru

In this work new approach is offered to design heat pipes (HP) based on experience, acquired as a result of pilot and theoretical study of mechanisms of heat transfer, weight and an impulse in a HP. Modern approach to design and calculation of the most achievable heat transfer in the heat pipes (HP) is based on the simplified models which aren't considering processes of heterogeneous and homogeneous volume condensation in a steam stream, emergence of vortex structures as a result of processes of a blowing – a suction, hydraulic losses on friction at oncoming traffic of steam and liquid on interphase border. The movement of two-phase mix happening in the field of aerodynamic and gravitational forces leads to an uneven expense of the condensed phase on a heat-exchange surface of a match. Thermodynamic approach to a heat transfer intensification problem on the basis of concept of an exergy is reasonable (the part is warm which can be used for receiving mechanical work). It is offered to change the scheme of a vapor-liquid path for receiving refrigerating effect. However, these offers don't exhaust all opportunities to create new schematic diagrams of a HP, emergence of planimetric HP which successfully cope with heat-transfer at small thermal streams is known, for example. At the solution of a question of creation of devices capable to transfer big thermal streams at high specific thermal loadings, it is necessary to consider heat-transfer mechanisms in a vapor-liquid path. Consecutive and whenever possible fuller accounting of all mechanisms of heat-transfer in a HP is the cornerstone of creation of new highly effective HP.

**Keywords:** two-phase, heterophase fluctuations, interphase border

**Suggested citation:** Shults A.N. *Novye podkhody k proektirovaniyu teplovykh trub* [New approaches to design of heat pipes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 80–85.

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-80-85

### References

- [1] Shults A.N., Bystrov P.I., Goncharov V.F., Kharchenko V.N. *Issledovanie nestatsionarnogo teplo- i massoobmena v zhidkometallicheskikh teplovykh trubakh* [Research non-stationary warm and a mass exchange in the zhidkometallicheskikh heat pipes] *Heatmass Exchange–VI: Materials of VI All-Union Conference on Heatmass Exchange*. Minsk: ITMO AN BSSR, 1980, v. IV, pp. 94–99.
- [2] Shults A.N. *Perenos tepla, massy i impul'sa v isparitel'no-kondensatsionnykh teploobmennikakh: Dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Transfer of heat, weight and an impulse in vaporizing and condensation heat exchangers: Dis. ... Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow, 2006, 272 p.
- [3] Shults A.N. *Vybor opticheskikh metodov issledovaniya techeniy neravnovesnogo parovogo potoka* [Selection of optical methods of research of currents of a nonequilibrium steam stream] *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, 2006, no. 6 (48), pp. 135–140.
- [4] Shults A.N. *Opticheskie neodnorodnosti v neravnovesnom potoke teplovykh trub* [Optical of heterogeneity in a nonequilibrium stream of heat pipes.] *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*. Moscow, 2006, no. 6 (48), pp. 140–149.
- [5] Shults A.N., Danilov S.A., Ivlyutin A.I. *Vliyaniye ob'emnoy kondensatsii na teplomasoobmen v nizkotemperaturnoy teplovykh trub pri nalichii nekondensiruемого gaza* [Influence of volume condensation on heat-mass transfer in a low-temperature heat pipe in the presence of not condensed gas] *Works of the Second All-Union Conference «Thermophysics and Hydraulic Gas Dynamics of Processes of Evaporation and Condensation»*, Riga, 26–28 December 1988. Riga: RPI, 1988, v. II, pp. 10–11.
- [6] Shults A.N., Kharchenko V.N. *Exergetic approach to the problem of heat transfer intensification in heat pipes* [Exergetic approach to the problem of heat transfer intensification in heat pipes] *8th of International Conference Heat Pipe (14–18 September 1992, Beijing), China*.
- [7] Shults A.N., Kharchenko V.N. *Intensifikatsiya teploperenosa v elementakh silovoy optiki na osnove teplovykh trub* [Intensification of heattransfer in elements of power optics on the basis of heat pipes] *Voprosy gidrodinamiki i teploperedachi v tehnologicheskikh processah. Nauchnye trudy MLTI* [Questions of hydrodynamics and a heat transfer in technological processes. Scientific works of MLTI]. Moscow: MLTI, 1993, v. 259, pp. 36–48.
- [8] Shults A.N. *Opredeleniye ental'pii neravnovesnogo parovogo potoka* [Definition of an enthalpy of a nonequilibrium steam stream] *Tr. 4-y Ros. nats. konf. po teploobmenu*. Moskva, 23–27 oktyabrya 2006. Moscow: MEI, 2006, v. 5, pp. 329–332.
- [9] Shults A.N. *Poteri energii v parovom potoke teplovykh trub* [Losses of energy in a steam stream of heat pipes] *Sb. nauch. tr. doktorantov i aspirantov MGUL*, 2006, v. 334(7), pp. 24–26.
- [10] Shults A.N. *Modificirovannaya teplovaya truba dlya utilizatsii nizkopotencial'nykh teplovykh resursov* [The modified thermal pipe for utilization of low-potential thermal resources] *Sb. nauch. tr. doktorantov i aspirantov MGUL*, 2006, v. 334 (7), pp. 10–12.

### Author's information

**Shults Alexandr Nikolaevich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of Department of Physics of BMSTU (Mytishchi branch), shultsalek@mail.ru

Received 21.06.2017