

УДК 536.248.2

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.1.82925

Е.Н. Письменный, С.М. Хайрнатов\*, Б.М. Рассемакин  
КПИ им. Игоря Сикорского, Киев, Украина

## ТЕПЛООБМЕН В ЗОНЕ ИСПАРЕНИЯ АММИАЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

**Background.** There are no generalized correlations for the heat transfer intensity calculation in the evaporation zone of ammonia aluminum grooved heat pipe, which can be used in thermal stabilization systems of space satellites.

**Objective.** Development of calculation methods of the heat transfer coefficients in the evaporation zone of ammonia aluminium grooved heat pipes.

**Methods.** Experimental investigations, analysis and generalization of experimental data of heat transfer intensity in the evaporation zone of ammonia aluminum heat pipes, which were developed and manufactured in Igor Sikorsky KPI.

**Results.** Generalized formulas allow calculating heat transfer coefficients in the evaporation zone of ammonia aluminium heat pipes with outside diameters of 10.0, 12.5, 14.0 and 17.0 mm with the  $\Omega$ -shaped longitudinal axial grooves in the heat flux density range of 0.1 to 7.0 W/cm<sup>2</sup>.

**Conclusions.** The experimental data were obtained with accuracy of correlation  $\pm 20\%$  with the calculated data in accordance with the proposed formulas.

**Keywords:** aluminium grooved heat pipes; capillary structure; heat transfer intensity; evaporation; boiling; space systems.

### Введение

Тепловые трубы (ТТ) [1] известны как высокоэффективные пассивные теплопередающие устройства, позволяющие повысить теплопроводные характеристики и снизить массогабаритные показатели систем обеспечения тепловых режимов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов. Широкое использование получили алюминиевые ТТ с капиллярной структурой в виде аксиальных канавок на внутренней их поверхности (АКТТ) [2–4]. АКТТ изготавливаются методом экструзии сплавов алюминия [5], что позволяет получать канавчатую капиллярную структуру (КС) как одно целое с корпусом ТТ. При этом возможен широкий диапазон геометрических параметров как самой КС, так и корпуса ТТ, что дает возможность обеспечивать оптимальные режимы их работы в различных условиях. АКТТ, как правило, изготавливаются из сплавов алюминия марок 6060/6063, в качестве теплоносителя используются аммиак, а в некоторых случаях могут использоваться ацетон, пентан, метан, этан или пропилен. Конструкция АКТТ обеспечивает высокую теплопередающую способность в невесомости, в отличие от ТТ с порошковой, сетчатой и металоволокнистой КС [1]. АКТТ обладают высокой прочностью при низкой массе и во многом соответ-

ствуют характеристикам компактности современных спутниковых систем. Кроме того, сегодня АКТТ часто используются как элемент сотопанельных конструкций космических аппаратов [6, 7], предназначенных для установки бортовой аппаратуры, или в качестве радиатора теплосброса. Сотопанель сочетает в себе и несущие и терморегулирующие функции. Перспективными для использования в космической технике сегодня являются высокотемпературные ТТ с канавчатой капиллярной структурой, изготовленные из специальных высокопрочных стальных сплавов и с жидким натрием в качестве теплоносителя [8, 9]. Такие ТТ могут использоваться в космических ядерных энергоустановках.

Сегодня наиболее распространены АКТТ с трапециевидными [2, 10], прямоугольными [2, 10] и  $\Omega$ -образными канавками [11]. Такие АКТТ апробированы в условиях космоса и обеспечивают стабильное функционирование РЭА. Хотя разработкой и изготовлением АКТТ космического назначения в мире занимается большое количество фирм и институтов, в литературе отсутствуют обобщенные соотношения для расчета интенсивности теплообмена в зонах испарения таких ТТ. Обычно в публикациях приводятся данные по максимальной теплопередающей способности, температурным полям, термическим сопротивлениям и крайне редко ко-

\*corresponding autor: sergey.khairnатов@gmail.com

личесвенные характеристики интенсивности теплообмена ( $\alpha_n$ ) в зоне испарения и конденсации. Внутренняя задача – интенсификация теплообмена внутри АКТТ и понимание процессов в зоне ее испарения – является важной задачей в космической технике и в системах охлаждения РЭА наравне с внешней задачей – повышением интенсивности теплоотвода и теплоподвода от/к поверхности АКТТ, что обусловлено:

1) высокими требованиями к их теплопередающим характеристикам, в частности к температурному перепаду и термическому сопротивлению, которые напрямую связаны с интенсивностью теплообмена. Так, например, замена теплоносителя с аммиака на ацетон приводит к увеличению термического сопротивления в три и более раз, что приводит к увеличению температурного перепада по АКТТ на 6 °С и выше при передаваемой тепловой мощности более 100 Вт;

2) необходимостью выбора оптимальных режимов функционирования АКТТ, которые напрямую зависят от процессов во всех ее зонах – испарения, конденсации и транспорта (адиабатной зоны), с целью достижения минимальных термических сопротивлений и стабильной ее работы.

**Постановка задачи**

Целью исследований является разработка методики расчета коэффициентов теплообмена в зоне испарения аммиачных алюминиевых ТТ с продольными аксиальными канавками  $\Omega$ -образной формы в диапазоне плотностей теплового потока от 0,1 до 7,0 Вт/см<sup>2</sup>.

**Конструкции и геометрические характеристики исследованных тепловых труб**

Экспериментальные исследования проводились с АКТТ с  $\Omega$ -образными канавками, разработанными и изготовленными в лаборатории

тепловых труб ТЭФ КПИ им. Игоря Сикорского [11]. В таблице и на рис. 1 приведены общий вид и геометрические характеристики сечений исследованных корпусов АКТТ.

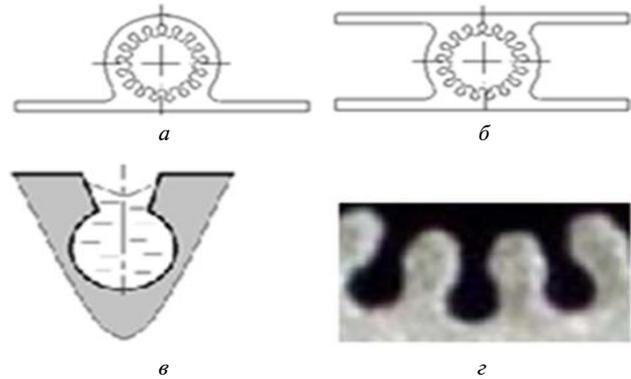


Рис. 1. Виды профилей АКТТ: а – с одной полкой; б – с двумя полками; в – форма  $\Omega$ -образной канавки КС; г – вид КС с  $\Omega$ -образными канавками

Размеры сечения продольной канавки капиллярной структуры ТТ обычно выбираются в соответствии с основным принципом функционирования ТТ, который заключается в том, что капиллярное давление должно быть больше вязкостных потерь давления в потоках пара и жидкости. Для  $\Omega$ -образных канавок это требование проблематично, так как наиболее узкая их часть, соединяющая артерию с паровым пространством, обеспечивает максимальный капиллярный напор и создает одновременно высокие вязкостные потери давления в жидком потоке теплоносителя. Поэтому в основу выбора геометрических размеров КС исследованных АКТТ положены аналитические и математические модели [11], основанные на анализе процессов тепломассопереноса в таких КС. Внешние диаметры и формы профилей определялись возможностью их использования в космической технике. Эксперименты проведены с более чем 70-ю образцами АКТТ различной конфигурации КС (см. таблицу) и с разной длиной зон испарения и конденсации. Длина АКТТ варьировалась от 400 до 3200 мм,

Таблица. Профили исследованных АКТТ (рис. 1)

Тип профиля для АКТТ	Наружный диаметр $d_{нр}$ , мм	Ширина наиболее узкой части канавки $s$ , мм	Глубина канавки $h$ , мм	Диаметр артерии $d_k$ , мм	Диаметр парового канала $d_{п}$ , мм
АС-КРА 5,0	10,0	0,50	1,65	1,00	5,0
АС-КРА 6,0	12,5	0,60	1,75	1,10	6,0
АС-КРА 7,5	14,0	0,65	1,85	1,11	7,5
АС-КРА 8,6	17,0	0,70	2,4	1,35	8,6

длина зоны испарения – от 30 до 750 мм, длина зоны конденсации – от 100 до 1200 мм.

### Методика экспериментов

Экспериментальная установка включала системы измерения температур, охлаждения, электропитания, измерения мощности нагревателей и устройства для изменения и измерения ориентации АКТТ в поле сил тяжести.

В экспериментах на внешних поверхностях исследуемых АКТТ создавались следующие условия.

1. В зоне испарения – подвод теплоты от нихромового нагревателя (нагревателей), расположенного непосредственно на корпусе ТТ. При установке нагревателя (нагревателей) для снижения контактного термического сопротивления использовалась теплопроводная паста КПТ-8.

2. В зоне транспорта – теплоизоляция марки K-Flex.

3. В зоне конденсации – отвод теплоты проточным теплообменником, расположенным на корпусе. При установке теплообменника использовалась паста КПТ-8 или угольная бумага.

Система измерения температуры АКТТ включала датчики температур (медь-константановые термопары) и аналогово-цифровые преобразователи ICP CON 7018. Измерения проводились в диапазоне температур 273–480 К. Для градуировки термопар использовался образцовый платиновый термометр сопротивления класса 0,01. Исходя из задач исследования и геометрии АКТТ, термопары устанавливались на корпусе под изоляцией в следующем порядке: 4–8 шт. в зоне испарения; 2–3 шт. в адиабатной зоне; 3–5 шт. в зоне конденсации. Погрешность измерений температуры составляла  $\pm 0,5$  °С. Датчики температуры крепились на корпусе АКТТ специальной клейкой алюминиевой лентой.

Нагреватели подключались к источнику питания через стабилизатор напряжения типа СН-0.9. В качестве источника питания использовался лабораторный автотрансформатор TRW (ЛАТР), с помощью которого регулировалась устанавливаемая мощность нагревателя  $Q$  в диапазоне значений  $Q = 10$ –400 Вт. Контроль мощности осуществлялся по показаниям ваттметров Д529 или Д5088 класса точности соответственно 0,1 и 0,2.

Система охлаждения на основе жидкостного лабораторного термостата Hubert HS60 обеспечи-

вала стационарные и нестационарные условия в зоне конденсации АКТТ. Постоянная на входе температура антифриза (NEPU P999) поддерживалась автоматически. При этом отклонение температур не превышало 0,5 К в диапазоне 280–313 К и 1 К в диапазоне 313–363 К.

В качестве устройства измерения превышения зоны испарения над зоной конденсации (или наоборот) использовался цифровой угломер LaserLiner "DigiLevel Pro", который позволял определять превышение с погрешностью до 0,1°.

Особенности измерения температур позволяли определять осредненную характеристику интенсивности теплообмена в зоне испарения в виде условного (эффективного) среднего коэффициента теплообмена:

$$\alpha_{и} = \frac{Q}{F_{и}(t_{и} - t_{п})},$$

где  $t_{и}$  – средняя температура зоны испарения, которая определялась как среднеарифметическая величина по показаниям термопар, установленных в зоне испарения, °С;  $t_{п}$  – температура пара, за которую принималась средняя температура адиабатной зоны, °С;  $F_{и}$  – площадь поверхности теплообмена в зоне испарения, м<sup>2</sup>, определяемая по формуле

$$F = \Sigma F_{к} L_{и},$$

где  $\Sigma F_{к}$  – суммарная площадь теплообменной поверхности канавок капиллярной структуры, м<sup>2</sup>;  $L_{и}$  – длина зоны испарения или конденсации, м.

Эта величина учитывает все возможные виды переноса теплоты в КС: теплопроводность стенок между канавками, выполняющих функцию микроребер, теплопроводность жидкости, заполняющей канавки, теплоотдачу с поверхности мениска и торцов микроребер (см. рис. 1, в, з), а также теплоотдачу с поверхности КС при кипении теплоносителя. Аналогом величины  $\alpha_{и}$  является приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{conv}$ , используемый в качестве осредненной характеристики интенсивности теплообмена ребренных поверхностей [12].

Погрешность экспериментального определения среднего коэффициента теплообмена не превышала 17,6 % в соответствии с рекомендациями [13].

**Анализ и обсуждение результатов исследований**

Исследования теплообмена в зоне испарения АКТТ проводились в области тепловых нагрузок  $q = 0,1-7,0 \text{ Вт/см}^2$  для трех видов теплоносителей – аммиака, ацетона и пентана. Экспериментальные данные представлялись в виде зависимостей  $\alpha_{и} = f(q)$ . Всего было получено более 500 экспериментальных точек. Анализ полученных данных показывает, что в самом общем случае в зависимостях  $\alpha_{и} = f(q)$  для каждого теплоносителя можно выделить четыре основных режимных зоны [14] (рис. 2):

- зону “А”, соответствующую процессам испарения (конвективную зону);
- зону “Б”, соответствующую процессу развитого пузырькового кипения;
- зону “В”, соответствующую процессу переходного режима от пузырькового кипения до пленочного;
- зону “Г”, соответствующую началу кризисных явлений и кризису в зоне испарения АКТТ.

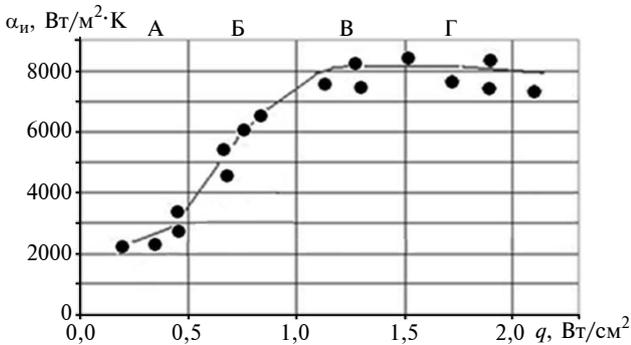


Рис. 2. Зависимость  $\alpha_{и} = f(q)$  для АКТТ АС-КРА6,0

На параметры зависимостей  $\alpha_{и} = f(q)$ , т.е. на уровни значений  $\alpha_{и}$ , размеры характерных зон, величины  $q$ , при которых происходит переход от одного режима к другому, влияют следующие основные факторы:

- вид теплоносителя;
- абсолютные значения и соотношения длин АКТТ, их зон испарения и конденсации;
- геометрические характеристики поперечного сечения (профиля) АКТТ.

Было обнаружено, что для разных конструкций АКТТ, а точнее для различных их длин и длин зон испарения и конденсации, одинаковым значениям коэффициентов теплообмена могут

соответствовать разные значения плотности теплового потока. Кроме того, может изменяться и характер самой зависимости, представленной на рис. 2. Так, например, за зоной “А” может сразу начинаться зона “В”. То есть процесс испарения сразу переходит в процесс переходного режима от пузырькового кипения к пленочному.

На рис. 3 представлены результаты, полученные для АКТТ (АС-КРА 8,6): длина АКТТ – 1500 мм, длина зоны конденсации – 220 мм. Результаты приведены для двух длин зон испарения и соответствующей им эффективной длины ( $L_{эф}$ ) АКТТ:  $L_{и} = 35 \text{ мм}$  и  $L_{эф} = 1375 \text{ мм}$ ,  $L_{и} = 210 \text{ мм}$  и  $L_{эф} = 1285 \text{ мм}$ . Эффективная длина ТТ является их стандартной геометрической характеристикой. Она определяется как сумма длины адиабатной (транспортной) зоны ТТ и среднего арифметического значения ее длин зон испарения и конденсации. Комплексно со свойствами теплоносителя данный параметр является определяющим для характера движения теплоносителя в канавчатой капиллярной структуре, скорости его подачи в зону испарения и возникновения кризисных явлений вследствие частичного и полного осушения капиллярной структуры. Результаты, представленные на рис. 3, демонстрируют, что почти при одинаковых значениях максимальной передаваемой тепловой мощности ( $Q_{max}$ ) и эффективной длины рассматриваемых АКТТ (соответственно 280 Вт и 1285 мм, 250 Вт и 1375 мм) существуют различные зависимости  $\alpha_{и} = f(q)$  для каждой из них. Так, для первой АКТТ, с учетом большой длины ее зоны испарения и, соответственно, большой площади теплоподвода, величина плотности теплового потока, соответствующая переходу в режим “Г”, значительно ниже. Именно эффективные длины АКТТ являются при таком сравнении определяющими характеристиками начала осушения их зон испарения.

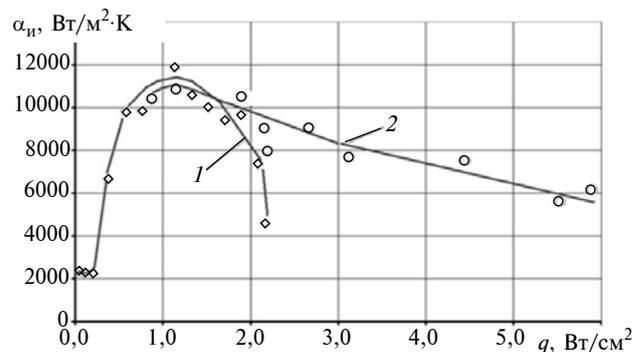


Рис. 3. Зависимости  $\alpha_{и} = f(q)$  для АКТТ АС-КРА 8,6: 1 –  $L_{и} = 210 \text{ мм}$ ; 2 –  $L_{и} = 35 \text{ мм}$

Некоторые результаты демонстрировали также, что переход в режим "В" может осуществляться еще при конвективном режиме. Так, для АКТТ, заправленных аммиаком, с эффективной длиной 750 мм и длиной зоны испарения 750 мм переход в режим "В", а затем в режим "Г" был зафиксирован при плотности теплового потока менее  $1 \text{ Вт/см}^2$  в конвективной зоне.

Данные результаты свидетельствуют о том, что необходимо учитывать не только плотность теплового потока в зоне испарения, свойства теплоносителя, геометрические характеристики капиллярной структуры, но и эффективную длину АКТТ.

Влияние геометрических характеристик элементов профиля на  $\alpha_{и}$  оценить в полной мере не удалось, так как размер наиболее узкой части канавки ( $s$ ) и диаметр артерии ( $d_k$ ) в силу технологических причин практически не варьировались при существенном изменении остальных параметров: глубины канавки ( $h$ ), высоты наиболее узкой части канавки (высоты трапеции) ( $h_1$ ), диаметра парового канала ( $d_{пк}$ ) и наружного диаметра ( $d_{нр}$ ). Из общего анализа физических процессов в КС следует, что уменьшение размера  $s$  приводит к увеличению капиллярного эффекта и увеличению подачи жидкой фазы в зону испарения. В тоже время это сопровождается ухудшением отвода паровой фазы из канавок в паровой канал. Условие  $s < d_k$  способствует скоплению пузырьков пара в месте выхода из артерии, повышению давления и уменьшению интенсивности парообразования. При достижении критического давления "паровая пробка" выходит в паровой канал, давление в КС падает, и интенсивность парообразования повышается. Эти процессы носят периодический характер и вызывают пульсации значений  $\alpha_{и}$ .

Повышение диаметра парового канала  $d_{пк}$  улучшает условия удаления пара из зоны испарения и способствует увеличению интенсивности теплообмена.

В исследованиях важное место уделялось поиску обобщенного эмпирического параметра, наиболее адекватно учитывающего влияние геометрических характеристик профиля АКТТ на интенсивность теплообмена. Проведенный регрессионный анализ показал, что в рассматриваемых интервалах геометрических параметров АКТТ для зон "Б" и "В" такой величиной является отношение площади сечения парового

канала  $F_{пк}$  к площади сечения канавки  $F_k$ , а для зоны "А" – отношение  $s/h$ .

В заключение анализа следует отметить, что описанная выше классификация режимов теплообмена в зоне нагрева АКТТ в значительной степени не соответствует выводам исследований [15], выполненных с открытыми канавчатыми КС. Авторы этих работ обнаружили только три основных режима – режим испарения, режим кипения и не выявленный в нашем анализе импульсно-пульсационный режим. Причиной отмеченного различия является то, что эксперименты [15, 16] проводились на открытых плоских поверхностях с канавчатой КС. Условия теплообмена, формирующиеся на таких поверхностях, существенно отличаются от условий, которые имеют место в герметичных замкнутых устройствах – ТТ. В стесненных условиях закрытых систем на интенсивность переноса теплоты в зоне нагрева в первую очередь влияют гидродинамические процессы взаимодействия потоков жидкости и пара в продольных сопряженных каналах. В открытых же системах поток пара выходит в свободный объем, и такое взаимодействие приобретает совершенно иной характер.

#### Расчет коэффициентов теплообмена в зоне испарения АКТТ

На основе полученных экспериментальных данных была разработана система обобщенных соотношений, которая легла в основу инженерной методики расчета теплообмена в зоне испарения АКТТ.

Система включает выражения для расчета  $\alpha_{и}$  отдельно для каждой из трех актуальных режимных областей "А", "Б" и "В" (см. рис. 2). Такой подход обусловлен тем, что механизмы переноса теплоты в выделенных режимных зонах существенно отличаются друг от друга. Получить при этом единую формулу, удобную для инженерных расчетов и охватывающую весь диапазон изменения  $q$ , не представляется возможным.

В режимной области "А" (см. рис. 2), соответствующей наименьшим тепловым нагрузкам, кипение в КС отсутствует. Жидкость испаряется с поверхности менисков, и слабые конвективные токи в канавках мало сказываются на процессе переноса теплоты. Их влияние ощущается лишь при значениях  $q$ , близких к верхней границе зоны "А". В этом случае интенсивность теплообмена определяется прежде

всего теплопроводностью слоя жидкости в КС и металлических стенок между канавками. Коэффициент теплообмена в данной режимной зоне может быть определен в соответствии с зависимостью

$$\alpha_{и} = 4,7 \cdot \frac{\lambda_{ж}}{d_{к}} \cdot \left( \frac{s}{h_1} \right)^{0.12}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $d_{к}$  – диаметр канавки, м;  $s$  – ширина наиболее узкой части канавки, м;  $h_1$  – высота наиболее узкой части канавки (высота трапеции), м.

На рис. 4 представлены результаты оценки точности обобщенной формулы (1). Для оценки использовалось отношение экспериментальных значений  $\alpha_{и}$  к значениям, рассчитанным по формуле (1) при различных уровнях тепловой нагрузки  $q$ . Как видно из рисунка, рассеив значений  $\alpha_{и}^э/\alpha_{и}^р$  укладывается в границах  $\Delta = \pm 20\%$ .

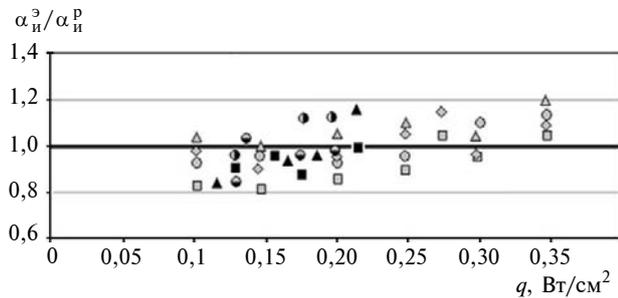


Рис. 4. Оценка итоговой точности обобщенной формулы (1) для режима “А”:  $\square$  – АС-КРА 17,0 (теплоноситель аммиак);  $\circ$  – АС-КРА 7,5 (теплоноситель аммиак);  $\triangle$  – АС-КРА 6,0 (теплоноситель аммиак);  $\diamond$  – АС-КРА 5,0 (теплоноситель аммиак);  $\blacktriangle$  – АС-КРА 6,0 (теплоноситель ацетон);  $\blacksquare$  – АС-КРА 5,0 (теплоноситель ацетон);  $\bullet$  – АС-КРА 6,0 (теплоноситель пентан);  $\circ$  – АС-КРА 5,0 мм (теплоноситель пентан)

В режиме развитого пузырькового кипения (режим “Б”, см. рис. 2) и в переходном режиме от пузырькового кипения к пленочному (режим “В”, см. рис. 2) процесс парообразования проходит по всей поверхности смоченного периметра канавок. В режимах “Б” и “В” геометрические размеры профиля АКТТ учитываются как отношение площади парового канала к площади канавки. Дополнительно рассматривается отношение плотности пара к разнице плотности жидкости и пара, что опреде-

ляет движущую силу выхода паровых пузырей из КС. Таким образом, данное отношение является немаловажным фактором, влияющим на интенсификацию теплообмена при кипении. Также учитываются плотность теплового потока, подводимая к АКТТ, и комплекс, характеризующий интенсивность прогрева пристенных слоев жидкости, фактически определяющий скорость возникновения центров парообразования в соответствии с формулой Д.А. Лабунцова [17].

В общем виде для режима “Б” (см. рис. 2) рекомендуется зависимость

$$\alpha_{и} = C_q \cdot \left( \frac{F_{п}}{F_{к}} \right)^{0,95} \cdot \left( \frac{\lambda_{ж}^2}{\sigma \cdot \nu_{ж} \cdot t_s} \right)^{1/3} \times \left( \frac{\rho_{п}}{\rho_{ж} - \rho_{п}} \right)^{0,05} \cdot q^{2/3}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м<sup>2</sup>;  $\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{п}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $t_s$  – температура насыщения, °С;  $F_{п}$  – площадь парового канала, м<sup>2</sup>;  $F_{к}$  – площадь канавки, м<sup>2</sup>;  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $C_q$  – коэффициент, определяемый по формуле

$$C_q = 0,025 \cdot (1 - e^{-5q}).$$

Дополнительно следует учитывать значения плотности теплового потока ( $q_k$ ), разделяющего режимы “Б” и “В”. Данное значение, определяющее границу перехода от режима развитого пузырькового кипения к переходному режиму для теплоносителя аммиак, равно 1,5 Вт/см<sup>2</sup>.

Результаты исследования интенсивности теплообмена в режиме “Б” приведены на рис. 5. Для оценки использовалось отношение экспериментальных значений  $\alpha_{и}$  к значениям, рассчитанным по формуле (2) при различных уровнях тепловой нагрузки  $q$ . Как видно из рисунка, рассеив значений  $\alpha_{и}^э/\alpha_{и}^р$  укладывается в границах  $\Delta = \pm 20\%$ . Данный режим является наиболее благоприятным для функционирования АКТТ – при нем возможно получить наименьшие значения ее термического сопротивления.

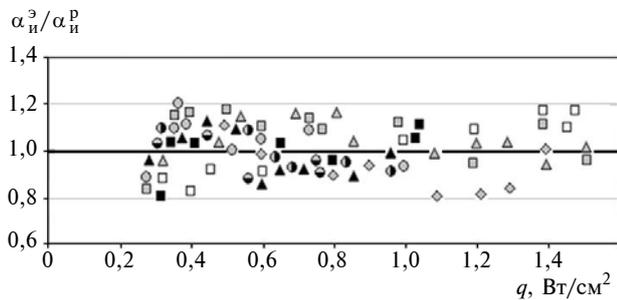


Рис. 5. Оценка итоговой точности обобщенной формулы (2) для режима “В”: □ – АС-КРА 17,0 (теплоноситель аммиак); ○ – АС-КРА 7,5 (теплоноситель аммиак); ▲ – АС-КРА 6,0 (теплоноситель аммиак); ◆ – АС-КРА 5,0 (теплоноситель аммиак); ▲ – АС-КРА 6,0 (теплоноситель ацетон); ■ – АС-КРА 5,0 (теплоноситель ацетон); ● – АС-КРА 6,0 (теплоноситель пентан); ● – АС-КРА 5,0 мм (теплоноситель пентан)

Для режимной зоны “В” дополнительно вводится коэффициент  $C_{и}$ , учитывающий гидравлические и тепловые процессы, которые снижают интенсивность теплообмена в зоне испарения при повышении плотности теплового потока. Для этой зоны предлагается следующая зависимость:

$$\alpha_{и} = 0,025 \cdot \left(\frac{F_{п}}{F_{к}}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\lambda_{ж}^2}{\sigma \cdot \nu_{ж} \cdot t_s}\right)^{1/3} \times \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж} - \rho_{п}}\right)^{0,05} \cdot q^{2/3} \cdot C_{и}, \quad (3)$$

где  $C_{и}$  для АКТТ определяется по формуле

$$C_{и} = \left(\frac{q}{q_k}\right)^{-0,96}$$

Формулы (1)–(3) справедливы при отношении площади канавок к площади корпуса капиллярной структуры, равном 0,6–0,8.

При этом следует учитывать, что режимная зона “В” характеризуется сильными флуктуациями коэффициентов теплообмена. Амплитуда таких флуктуаций может достигать 2000 Вт/м<sup>2</sup>·К, а их частота – до 5 колебаний в секунду. В связи с этим формула (3) позволяет оценивать их осредненное значение.

Режим “В” характеризовался плавным убыванием интенсивности теплообмена. Результаты исследования в данном режиме приведены на рис. 6. Для оценки использовалось отношение экспериментальных значений  $\alpha_{и}$  к

значениям, рассчитанным по формуле (2) при различных уровнях тепловой нагрузки  $q$ . Как видно из рисунка, рассеив значений  $\alpha_{и}^3/\alpha_{и}^p$  укладывается в границах  $\Delta = \pm 20\%$ .

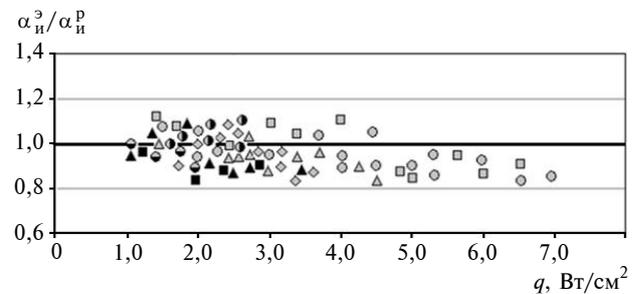


Рис. 6. Оценка итоговой точности обобщенной формулы (3) для режима “В”: □ – АС-КРА 17,0 (теплоноситель аммиак); ○ – АС-КРА 7,5 (теплоноситель аммиак); ▲ – АС-КРА 6,0 (теплоноситель аммиак); ◆ – АС-КРА 5,0 (теплоноситель аммиак); ▲ – АС-КРА 6,0 (теплоноситель ацетон); ■ – АС-КРА 5,0 (теплоноситель ацетон); ● – АС-КРА 6,0 (теплоноситель пентан); ● – АС-КРА 5,0 мм (теплоноситель пентан)

Эффективная длина АКТТ определяет границу начала кризисных явлений, т.е. границу перехода в режимную зону “Г”. В инженерной методике расчета теплообмена в зоне испарения АКТТ она учитывается в формуле для определения ее граничной плотности теплового потока  $q_{гр}$  – границы начала режимной зоны “Г”:

$$q_{гр} = \frac{QL}{L_{эф} \cdot F_{и}},$$

где  $L_{эф}$  – эффективная длина АКТТ, м;  $QL$  – максимальная теплотранспортная способность АКТТ, Вт·м;  $F_{и}$  – площадь поверхности теплообмена в зоне испарения, м<sup>2</sup>.

На рис. 7 приведены сопоставления расчетных данных по формулам (1)–(3) с результатами экспериментов и результатами других авторов для аммиачных АКТТ. Сравнение с расчетом по эмпирическим зависимостям [15] показывает хорошую сходимость для режима “Б”. Однако они не учитывают особенности теплообмена в АКТТ в режимах “В” и “Г”. Также достаточно хорошее совпадение получено с экспериментальными результатами для АКТТ с трапециевидными канавками и диаметром 12,5 мм, приведенными в [18].

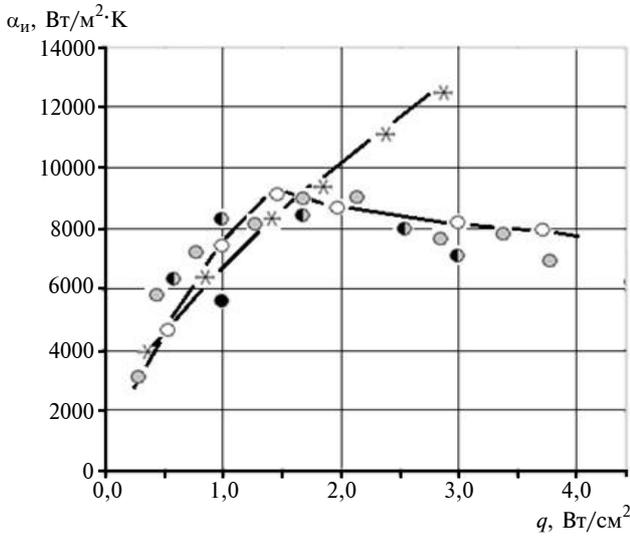


Рис. 7. Средний коэффициент теплообмена в зоне испарения для теплоносителя аммиак:  $\circ$  – расчет по формулам (1)–(3) для АКТТ АС-КРА6,0;  $\bullet$  – экспериментальные данные для АКТТ АС-КРА6,0;  $\bullet$  – для АКТТ с диаметром 11 мм [19];  $\bullet$  – экспериментальные данные для АКТТ диаметром 12,5 мм с трапецидальными канавками, приведенные в [18];  $\ast$  – расчет по формулам, приведенным в [15]

**Выводы**

1. Область функционирования АКТТ, используемых в космической технике, по тепловой нагрузке можно разбить на четыре зоны:

- зону “А”, соответствующую процессам испарения (конвективная зона);
- зону “Б”, соответствующую процессу развитого пузырькового кипения;
- зону “В”, соответствующую процессу переходного режима от пузырькового кипения к пленочному;
- зону “Г”, соответствующую началу кризисных явлений и кризису в зоне испарения АКТТ.

2. Интенсивность теплообмена в зоне испарения зависит от следующих основных факторов:

- плотности подведенного теплового потока;
- свойств теплоносителя;
- геометрических характеристик профиля АКТТ;
- эффективной длины АКТТ, а также длины ее зоны испарения.

3. Функционирование АКТТ желательно при режимах, соответствующих зоне “Б” и началу зоны “В”. Для этого при разработке АКТТ нужно руководствоваться следующими соображениями:

- лучшим теплоносителем для АКТТ является аммиак;
- необходимо обеспечивать максимально возможное количество канавок КС при максимально возможном диаметре артерии и заданном наружном диаметре АКТТ;
- выбор ширины наиболее узкой части канавки с одной стороны ограничен необходимым капиллярным напором, а с другой – возможностью возникновения более раннего запаривания КС;
- выбор высоты наиболее узкой части канавки с одной стороны ограничен необходимой для функционирования АКТТ во всем заданном температурном диапазоне массой заправки, а с другой – обеспечением максимально возможного диаметра парового канала.

4. Для расчета интенсивности теплообмена в зоне испарения АКТТ рекомендуются зависимости (1)–(3), которые справедливы в диапазоне плотностей тепловых потоков  $q = 0,1–7,0 \text{ Вт/см}^2$  и обеспечивают погрешность расчета  $\Delta = \pm 20 \%$ .

5. В дальнейшем планируется разработка методик расчета коэффициентов теплообмена в зоне конденсации аммиачных АКТТ.

**Список литературы**

1. Reay D.A., Kew P.A. Heat Pipes. – Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann, 2014. – 282 p.
2. Hoa C., Demolder B., Alexandre A. Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL SPACE's satellites // Appl. Thermal Eng. – 2003. – 23. – P. 1099–1108.
3. Hoa C. Thermique des caloducs a rainures axiales: Etudes et réalisations pour des applications spatiales: Ph.D. thesis. – University of Poitiers, 2004.
4. Investigation performance of axial grooved heat pipes with high thermal capacity / V. Barantsevith, O. Golovin, K. Goncharov et al. // Proc. 12th Int. Heat Pipe Conf. – Moscow, 2002. – P. 86–92.
5. Method of making a re-entrant groove heat pipe: US Patent 4 457 059 / J.P. Alario, R. Kosson, E. Leszak. – 1984.

6. *Heat pipe profile*: EU Patent No. EP0027845 A2 / Schlitt R. – 1981.
7. *Embedded heat pipe structure*: EU Patent No. EP0853226 A2 / Antoniuk D. (NMI), Baker J., Wittkopp G. – 1998.
8. Панов Е.Н. Исследование и разработка высокотемпературных тепловых труб для термостабилизации электролиза при производстве магния: Дис. ... канд. техн. наук. – К., 1982. – 259 с.
9. W.G. Anderson, D. Beard, C. Tarau. Self-venting arterial heat pipes for spacecraft applications // Proc. Joint 18th IHPC. – Jeju, Korea, 2016. – P. 507–514.
10. Christine H., Benoit D., Alain A. Roadmap for developing heat pipes for alcatel space's satellites // Proc. 12th Int. Heat Pipe Conf. – Moscow, 2002. – P. 103–108.
11. Space-applied aluminum profiled heat pipes with axial grooves: experiments and simulation / B. Rassamakin, S. Khairnasov, A. Rassamakin, O. Alpherova // Heat Pipe Sci. Technol. – 2011. – 1, № 4. – P. 313–327.
12. Pis'mennyi E.N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes // Appl. Thermal Eng. – 2016. – 106. – P. 1075–1087.
13. Kim J.H., Simon T.W., Viskanta R. Journal of heat transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results // J. Heat Transfer. – 1993. – 115/5. – № 5.
14. Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Кудрявцев А.П. Теплофизика высоких температур. – М., 1968. – 250 с.
15. Бурдо О.Г. Режимы и интенсивность теплоотдачи при парообразовании на профилированных поверхностях // ИФЖ. – 1987. – 52, № 6. – С. 899–906.
16. Shekriladze I.G. Heat transfer in the liquid evaporation process on grooved capillary structures // 9th Int. Heat Pipe Conf. – Albuquerque, USA, 1995. – P. 825–830.
17. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 388 с.
18. Grooved heat pipes with nonporous deposit in an evaporator / L. Vasiliev, L. Grakovich, M. Rabetsky et al. // Heat Pipe Sci. Technol. – 2010. – 1, № 3. – P. 219–236.
19. High capacity gdooved heta pipes / M. Dubois, S. van Oost, G. Bekaert, W. Supper // Proc. 4th European Symposium on Space Environmental and Control Systems. – Florence, Italy, 1991. – P. 575–581.

## References

- [1] D.A. Reay and P.A. Kew, *Heat Pipes*. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [2] C. Hoa *et al.*, “Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL SPACE's satellites”, *Appl. Thermal Eng.*, vol. 23, pp. 1099–1108, 2003.
- [3] C. Hoa, “Thermique des caloducs a rainures axiales: Etudes et réalisations pour des applications spatiales”, Ph.D. thesis, University of Poitiers, 2004.
- [4] V. Barantsevith *et al.*, “Investigation performance of axial grooved heat pipes with high thermal capacity”, in *Proc. 12th Int. Heat Pipe Conf.*, Moscow, 2002, pp. 86–92.
- [5] J.P. Alario *et al.*, “Method of making a re-entrant groove heat pipe”, U.S. Patent 4 457 059, July 3, 1984.
- [6] R. Schlitt, “Heat pipe profile”, EU Patent EP0027845 A2, 1981.
- [7] D. Antoniuk *et al.*, “Embedded heat pipe structure”, EU Patent EP0853226 A2, 1998.
- [8] Ye.N. Panov, “Investigation and development of high temperature heat pipe for thermal stabilization of electrolyze process at magnesium production”, Ph.D. dissertation, NTUU KPI, Department of theoretical and industrial heat engineering”, 1982 (in Russian).
- [9] W.G. Anderson *et al.*, “Self-venting arterial heat pipes for spacecraft applications”, in *Proc. Joint 18th IHPC*, Jeju, Korea, 2016, pp. 507–514.
- [10] H. Christine *et al.*, “Roadmap for developing heat pipes for alcatel space's satellites”, in *Proc. 12th Int. Heat Pipe Conf.*, Moscow, Russia, May 19–24, 2002. doi: 10.1016/S1359-4311(03)00039-5
- [11] B. Rassamakin, “Space-applied aluminum profiled heat pipes with axial grooves: experiments and simulation”, *Heat Pipe Sci. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 313–327, 2011. doi: 10.1615/HeatPipeScieTech.v1.i4.20
- [12] E.N. Pis'mennyi, “Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes”, *Appl. Thermal Eng.*, vol. 106, pp. 1075–1087, 2016. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.081
- [13] J.H. Kim, “Journal of heat transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results”, *J. Heat Transfer*, vol. 115/5, 1993. doi:10.1115/1.2910670
- [14] V.I. Subbotin *et al.*, *Thermophysics of High Temperatures*. Moscow, Russia, 1968 (in Russian).
- [15] O.G. Burdo, “Regimes and heat transfer intensity at evaporation on grooved surfaces”, *IFG*, vol. 52, [6], pp. 899–906, 1987 (in Russian).

- [16] I.G. Shekrladze, "Heat transfer in the liquid evaporation process on grooved capillary structures", in *Proc. 9th Int. Heat Pipe Conf.*, Albuquerque, May 1–5, 1995, pp. 825–830. doi:10.1115/1.2822638
- [17] D.A. Labuncov, *Physical Bases of Energy Science. Selected Works on Heat Transfer, Fluid Dynamics, Thermodynamics*. Moscow, Russia: MEI, 2000 (in Russian).
- [18] L. Vasiliev *et al.*, "Grooved heat pipes with nonporous deposit in an evaporator", *Heat Pipe Sci. Technol.*, vol. 1, [3], pp. 219–236, 2010.
- [19] M. Dubois *et al.*, "High capacity grooved heat pipes", in *Proc. 4th European Symposium on Space Environmental and Control Systems*, Florence, Italy, October 21–24, 1991, pp. 575–581. doi: 10.4271/932303

Є.М. Письменний, С.М. Хайрнатов, Б.М. Рассамкін

#### ТЕПЛОБМІН В ЗОНІ ВИПАРОВУВАННЯ АМІАЧНИХ АЛЮМІНІЄВИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ

**Проблематика.** В літературі відсутні узагальнені співвідношення для розрахунку інтенсивності теплообміну в зоні випаровування аміачних алюмінієвих теплових труб з канавчатою (конструкційною) капілярною структурою, призначених для використання в системах забезпечення теплових режимів космічних апаратів.

**Мета досліджень.** Розробка методики розрахунку коефіцієнтів теплообміну в зоні випаровування аміачних алюмінієвих теплових труб з канавчатою капілярною структурою.

**Методика реалізації.** Експериментальні дослідження, аналіз і узагальнення експериментальних даних щодо інтенсивності теплообміну в зоні випаровування аміачних алюмінієвих теплових труб, розроблених і виготовлених у КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Результати досліджень.** Отримано узагальнені формули, які дають змогу розраховувати коефіцієнти теплообміну в зоні випаровування аміачних алюмінієвих теплових труб із зовнішніми діаметрами 10,0; 12,5; 14,0 і 17,0 мм та з поздовжніми аксіальними канавками  $\Omega$ -подібної форми в діапазоні густини теплового потоку від 0,1 до 7,0 Вт/см<sup>2</sup>.

**Висновки.** Отримані експериментальні дані з відхиленням  $\pm 20\%$  корелюють із розрахунковими значеннями відповідно до запропонованих узагальнень.

**Ключові слова:** алюмінієва теплова труба; капілярна структура; інтенсивність теплообміну; випаровування; кипіння; космічна техніка.

Е.Н. Письменный, С.М. Хайрнатов, Б.М. Рассамкин

#### ТЕПЛОБМЕН В ЗОНЕ ИСПАРЕНИЯ АММИАЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

**Проблематика.** В литературе отсутствуют обобщенные соотношения для расчета интенсивности теплообмена в зоне испарения аммиачных алюминиевых тепловых труб с канавчатой (конструкционной) капиллярной структурой, предназначенных для использования в системах обеспечения тепловых режимов космических аппаратов.

**Цель исследований.** Разработка методики расчета коэффициентов теплообмена в зоне испарения аммиачных алюминиевых тепловых труб с канавчатой капиллярной структурой.

**Методика реализации.** Экспериментальные исследования, анализ и обобщение экспериментальных данных по интенсивности теплообмена в зоне испарения аммиачных алюминиевых тепловых труб, которые разработаны и изготовлены в КПИ им. Игоря Сикорского.

**Результаты исследований.** Получены обобщенные формулы, позволяющие рассчитывать коэффициенты теплообмена в зоне испарения аммиачных алюминиевых тепловых труб с внешними диаметрами 10,0; 12,5; 14,0 и 17,0 мм с продольными аксиальными канавками  $\Omega$ -образной формы в диапазоне плотностей теплового потока от 0,1 до 7,0 Вт/см<sup>2</sup>.

**Выводы.** Полученные экспериментальные данные с отклонением  $\pm 20\%$  коррелируют с расчетными значениями в соответствии с предложенными обобщениями.

**Ключевые слова:** алюминиевая тепловая труба; капиллярная структура; интенсивность теплообмена; испарение; кипение; космическая техника.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
14 листопада 2016 року